



Effet de l'entraînement sur l'anthropométrie, les performances physiques et les réponses des axes somatotrope et cortico-gonadotrope chez l'adolescent footballeur de haut niveau

Mohamed Ali Hammami

► To cite this version:

Mohamed Ali Hammami. Effet de l'entraînement sur l'anthropométrie, les performances physiques et les réponses des axes somatotrope et cortico-gonadotrope chez l'adolescent footballeur de haut niveau. Education. Université Rennes 2, 2013. Français. NNT : 2013REN20006 . tel-01124092

HAL Id: tel-01124092

<https://theses.hal.science/tel-01124092>

Submitted on 6 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE / UNIVERSITE RENNES 2
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE RENNES 2

Mention : STAPS
Ecole doctorale Vie Agro Santé (VAS)

présentée par
HAMMAMI Mohamed Ali

Préparée au laboratoire Mouvement, Sport, Santé
M2S (EA 1274)
Université Rennes 2

Thèse soutenue le 8 janvier 2013
devant le jury composé de :

Thierry PAILLARD
Professeur des Universités – Université de Pau (France) / *Rapporteur*

Grégory DUPONT
Maître de conférences/HDR – Université de Lille 2 (France) / *Rapporteur*

Zouhair TABKA
Professeur en Médecine – Faculté de Médecine, Sousse (Tunisie) / *Examineur*

Jacques PRIOUX
Professeur des Universités – ENS Cachan (France) / *Examineur*

Abderraouf BEN ABDERRAHMANE
Docteur, ISSEP, Tunis (Tunisie) / *Co-Directeur de thèse*

Hassane ZOUHAL
Professeur des Universités – Université Rennes 2 (France) / *Directeur de thèse*

EFFET DE L'ENTRAINEMENT SUR L'ANTHROPOMETRIE, LES PERFORMANCES PHYSIQUES ET LES RÉPONSES DES AXES SOMATOTROPE ET CORTICO- GONADOTROPE CHEZ L'ADOLESCENT FOOTBALLEUR DE HAUT NIVEAU

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE.....	1
REVUE DE LA LITTERATURE.....	5
I. ANALYSE DE L'ACTIVITE FOOTBALL	6
I.1 Profil anthropométrique du footballeur.....	6
I.1.1 Chez l'adulte.....	7
I.1.2. Chez l'enfant et l'adolescent	10
I.2 Analyse des distances parcourues et de leurs intensités au cours d'un match	16
I.4. Analyse physiologique des exigences du Football.....	30
I.4.1 La fréquence cardiaque (FC).....	32
I.4.2. La consommation d'oxygène (VO2)	34
I.4.3 La lactatémie	36
II.ENTRAÎNEMENT EN FOOTBALL.....	38
II.1. Entraînement en endurance.....	38
II.2. Entraînement en force-vitesse.....	40
III. ADOLESCENCE, DEVELOPPEMENT BIOLOGIQUE ET FOOTBALL.....	41
III.1. Adolescence et développement biologique	41
III.2. Adolescence et pratique sportive	42
III.3. Maturation pubertaire et Football.....	43
III.4. Maturation pubertaire et processus de détection	43
III.5. Maturation pubertaire, anthropométrie, capacités physiques et habiletés techniques	43
IV. REPONSES ET ADAPTATIONS HORMONALES A L'EXERCICE ET A L'ENTRAÎNEMENT	44
IV.1. Axe corticotrope.....	45
IV.1.1. Le cortisol.....	45
IV.1.1.1 Effet de l'intensité de l'exercice	46
IV.1.1.2. Effet de la durée de l'exercice	47
IV.1.1.3. Effet de l'entraînement	48
IV.2. Axe gonadotrope	49
IV.2.1. La Testostérone	49
IV.2.1.1. Réponse de la testostérone à l'exercice	50
IV.2.1.2. Réponse de la testostérone à l'entraînement	52
IV.3. Axe somatotrope	53
IV.3.1. Hormone de croissance (GH).....	54
IV.3.1.1. Variation de GH à l'exercice.....	55
IV.3.1.1.1. Effet de l'intensité de l'exercice.....	55
IV.3.1.1.2. Effet de la durée de l'exercice	56
IV.3.1.1.3. Effet du type d'exercice	57
IV.3.1.2 Effet de l'entraînement.....	58
IV.3.2. Somatomédine-C ou IGF-I.....	60

IV.3.2.1. Effet de l'exercice	60
IV.3.2.2. Effet de l'entraînement	62
IV.3.3. Protéine porteuse d'IGF-I (IGFBP-3)	65
IV.3.3.1. Effet de l'exercice	65
IV.3.3.2. Effet de l'entraînement	66
SYNTHESE ET ORIENTATION DU TRAVAIL	68
CONTRIBUTION PERSONNELLE	71
IMETHODOLOGIE GENERALE.....	72
I.1. Les sujets.....	72
I.1.1. Groupes expérimentaux (GE)	72
I.1.2. Groupe témoin (GT).....	73
I.2. Protocole expérimental.....	74
I.2.1 Les mesures anthropométriques	74
I.2.2. Description des Aptitudes Physiques	76
I.2.2.1. Puissance maximale des membres inférieurs	76
I.2.2.2. Vitesse de Course	77
I.2.2.3. Estimation du potentiel aérobie.....	77
I.2.3. Déroulement des tests physiques	78
I.2.3.1. Le premier jour (J1)	78
I.2.3.2. Le deuxième jour (J2):	79
I.2.4. Les prélèvements sanguins.....	79
I.2.5. Les différents dosages biologiques	79
I.2.6. Mesure de la perception de l'effort (RPE = Rating of Perceived Exertion)	80
II. ANALYSE STATISTIQUE	81
LES ETUDES.....	83
I. ETUDE 1	84
I.1. Introduction.....	84
I.2. Méthode	86
I.3. Résultats	86
I.4. Discussion	91
I.5. Conclusion	94
II. ETUDE 2	95
II.1. Introduction.....	95
II.2. Méthodes.....	96
II.3. Résultats.....	97
II.4. Discussion.....	101
II.5. Conclusion	105
III. ETUDE 3	106
III.1. Introduction	106
III.2. Méthode.....	108
III.3. Résultats	109
III. 4. Discussion	120

III. 5. Conclusion.....	124
IV.ETUDE 4.....	126
IV.1. Introduction	126
IV.2. Méthode.....	127
IV.3.Résultats	128
IV.4. Discussion	135
CONCLUSION GENERALE	139
INTÉRÊTS PRATIQUES	142
PERSPECTIVES.....	144
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	145
ANNEXES	184

A la mémoire de ma femme Saida

A la mémoire de mon père El hedi

A ma chère mère Zohra

A mes filles Wissal, Ons et Sarra

A toute ma famille

A tous mes amis

Remerciements

À

Monsieur Le Professeur et Rapporteur

Thierry PAILLARD

Professeur des Universités – Université de Pau (France)



*Je suis très sensible au grand honneur que vous me faites en acceptant
de juger cette thèse.*

*Veuillez trouver dans ce travail le témoin de notre profond respect et notre
grande reconnaissance*

À

Monsieur Le Professeur et Rapporteur

Grégory DUPONT

Maître de conférences/HDR – Université de Lille 2(France)



*Vous avez accepté avec beaucoup de gentillesse de nous faire honneur
de juger notre modeste travail.*

Soyez assuré de mon respect et de ma grande reconnaissance.

Puisse ce travail vous satisfaire et témoigner de mon profond estime.

À

Notre Maître Monsieur Le Professeur

ZOUHAIR TABKA

Chef de Service de Physiologie et d'Exploration Fonctionnelle à l'Hôpital

Farhat Hached de Sousse



Vous me faite un grand honneur en acceptant de juger ce modeste travail.

*Votre rigueur scientifique, votre connaissance professionnelle, vos talents
pédagogiques et vos qualités humaines sont pour nous un exemple à suivre.*

*Nous sommes très fiers d'être parmi vos disciples et espérons être à la hauteur de
votre confiance.*

À

Monsieur Le Professeur

Jacques PRIoux

Professeur des Universités – ENS Cachan (France)



Qu'il nous soit permis de vous exprimer notre profond respect et nos sincères remerciements pour l'honneur que vous nous faites en acceptant de siéger à notre Jury de thèse.

À

Monsieur

Abderraouf BEN ABDERRAHMAN

*Maître Assistant à l'Institut Supérieur du Sport et de l'Education Physique de
Ksar Saïd, Tunis*



*Je vous remercie pour votre précieuse aide et vos conseils éclairés qui
m'ont permis de bien mener ce travail.*

*Vos qualités professionnelles, votre dévouement pour la recherche et
votre modestie suscite mon admiration.*

Ce travail vous est dédié en témoignage de mon profond respect.

À

Notre Maître et Directeur de Thèse

Monsieur Le Professeur

Zouhal HASSANE

Professeur des Universités – Université Rennes 2 (France)



*En témoignage de ma vive reconnaissance pour l'honneur que vous m'avez fait
en me confiant ce travail durant lequel j'ai beaucoup appris et apprécié Votre
Science et Votre Riche Expérience.*

*Je suis très touché par vos directives, vos suggestions et vos conseils, qui nous ont
facilité la tâche à bien des égards.*

*Votre gentillesse, votre bienveillance, vos qualités humaines et scientifiques et
votre disponibilité mérite toute l'admiration.*

*Que ce travail soit le témoignage de ma profonde reconnaissance et de mon grand
respect.*

*Je vous souhaite beaucoup de bonheur et de succès dans votre vie professionnelle
et familiale*

A Mon cher ami Ammar NEBIGH

Je vous remercie d'avoir été toujours à coté de moi tout au long de la préparation de ce travail, votre aide, votre enthousiasme, votre soutien et vos encouragements ont été une présence essentielle à la réalisation de cette thèse.

Madame le Professeur Agrégé monia ZAOUALI-AJINA

Durant ce travail, nous avons eu la chance et le privilège de bénéficier de votre science et de votre grande expérience. Nous vous remercions pour la précieuse aide trouvée auprès de vous. Soyez assurée de notre vive reconnaissance.

Madame Dorra BESBES

Pour votre disponibilité que vous m'avez manifestée et votre gentillesse sans égale. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de ma sincère reconnaissance et admiration.

A Monsieur le Docteur Souhaeil CHAMLI

Je vous remercie infiniment pour votre collaboration et votre disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail

A mes collègues thésard wiem KEBSI et Maha SALLAMI

Votre aide, votre collaboration, votre soutien et vos encouragements, ont été une présence essentielle à la réalisation de ce document.

A Samia Mjedri

Je vous remercie d'avoir été toujours à coté de moi tout au long de la préparation de ce travail, votre aide, votre gentillesse, votre soutien et vos encouragements ont été une présence essentielle à la réalisation de cette thèse.

AL'équipe du Laboratoire de Physiologie et d'Exploration Fonctionnelle à la Faculté de Médecine Ibn El Jazzar de Sousse, et mes dames les secrétaires du laboratoire.

A Tous le personnel, les techniciens biologistes et mes dames les secrétaires du service de biologie de l'Hôpital El KASSAB de Tunis.

A Tous les membres de la Direction Technique Nationale de football, les entraîneurs collègues qui par leurs intérêts et leurs disponibilités ont permis la réalisation de ce travail.

A Tous les personnels du Centre National de Préparation de l'élite de Borj Cédria Tunis

A Tous les jeunes footballeurs et tous les volontaires inclus dans ce travail.

A Toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce travail.

Quelles soient assurées de ma très sincère reconnaissance
et de ma sympathie.

Résumé

Le football est le sport le plus populaire dans le monde, surtout auprès des enfants et des adolescents. Optimiser le potentiel physique des jeunes footballeurs est l'un des principaux objectifs des académies et des centres de formation. En effet, les jeunes footballeurs élités doivent être prêts à réaliser et supporter des charges élevées d'entraînement observées dans le haut niveau. Le suivi des évolutions anthropométriques, des adaptations physiques, physiologiques et endocriniennes peut aider à mieux comprendre les effets de l'entraînement intensif chez le jeune footballeur élite et donc de mieux orienter le processus de développement. Ainsi, dans ce travail de thèse, quatre études ont été menées pour répondre à cette problématique. Dans la première, nous avons étudié **l'évolution des profils anthropométriques et physiques selon le poste de jeu chez des jeunes adolescents footballeurs tunisiens élités (étude sur une saison)**. Dans la seconde, nous avons analysé **les effets d'une saison d'entraînement footballistique sur les caractéristiques anthropométriques et sur les qualités physiques chez des jeunes adolescents footballeurs élités (étude sur une saison)**. Pour éviter le biais méthodologique lié à la maturation pubertaire nous avons aussi réalisé les mêmes mesures chez un groupe d'adolescents de même âge biologique. Lors des deux dernières études nous avons analysé les effets de deux saisons d'entraînement à haut niveau sur les réponses hormonales de l'axe somatotrope (GH, IGF-I, IGFBP3) (**Etude 3**) et de l'axe cortico-gonadotrope (Cortisol, Testostérone, SHBG) (**Etude 4**) chez des adolescents footballeurs élités par rapport à la charge d'entraînement et aux aptitudes physiques chez des jeunes footballeurs élités et des sujets contrôles de même âge biologique. Nos résultats montrent une amélioration significative des caractéristiques anthropométriques et des paramètres physiologiques et physiques durant tout le suivi chez ces jeunes footballeurs élités sans aucune distinction en fonction de la position de jeu. Ils indiquent aussi une probable accélération de la maturation pubertaire liée à la pratique footballistique de haut niveau. Nous avons aussi mis en évidence que le système endocrinien et tout particulièrement les hormones des axes somatotropes et cortico-gonadotrope ne semblent pas être affectées par l'entraînement réalisé au sein de cette académie de l'élite tunisienne. Cet entraînement semble même être bénéfique. Ce travail de thèse montre que l'analyse et le suivi longitudinal des caractéristiques anthropométriques, physiques, physiologiques et des réponses endocriniennes des jeunes footballeurs ne peut être que bénéfique sur le plan pratique. Notre travail a permis, au moins en partie, d'établir un profil de référence du jeune joueur élite tunisien. Ce genre de suivi permet de bien veiller à l'intégrité physique et à la bonne santé des jeunes sportifs en réduisant les risques de blessures ou encore le surentraînement.

Mots clés : Football, Jeunes Elites, Hormones, Croissance, Entraînement Intense.

Abstract

Football is the most popular sport in the world, especially among children and adolescents. Optimizing the physical potential of young soccer players is one of the main objectives of academies and training centers. In fact, the elite young players must be ready to perform and support high training loads observed at high level. Monitoring the anthropometric development, physical and physiological adaptations and endocrine responses may help to better understand the effects of intensive training in young elite soccer and thus help to guide the development process. Consequently, in this thesis four studies were conducted to answer this problematic. In the first one, we studied the *Physical and anthropometric profile according playing position in young elite soccer players (a longitudinal study)*. In the second, we analyzed the *Effects of a soccer season on anthropometric characteristics and physical fitness in elite young soccer players*. To avoid the classical methodological bias related to puberty and maturation, we also performed the same measurements in a group of adolescents of the same biological age. In the last two studies we analyzed the effects of two seasons of high-level training on hormonal responses of the somatotrophic axis (GH, IGF-I, IGFBP3) (**Study 3**) and cortical-gonadotropic axis (cortisol, testosterone, SHBG) (**Study 4**) in elite adolescents soccer players in relation to training load and to physical fitness in young elite soccer players and control subjects of the same biological age.

Our results showed a significant improvement in anthropometric characteristics, physical and physiological parameters throughout the follow-up in these elite young soccer players without distinction based on the position of the game. They also indicate a likely acceleration of pubertal maturation related to football practice at high level. We also demonstrated that the endocrine system and especially the hormones responses of somatotrophic and cortical-gonadotropic axis do not seem to be affected by the training process performed in the Academy of the Tunisian elite. This training process seems to be even beneficial.

This thesis shows that the analysis and monitoring longitudinal anthropometric characteristics, physical, physiological and endocrine responses of young footballers can be beneficial in practice. Our work has, at least in part, established a baseline profile of the young Tunisian elite player. This kind of monitoring can well ensure the physical integrity and health of young athletes by reducing the risk of injuries or overtraining.

Key words: Soccer, Young Elites, Hormones, Growth, Intense training.

Liste des abréviations

AC	: Âge civil
ACTH	: AdrénoCortico Tropic Hormone
ATT	: Attaquant
Ama	: Amateur
AO	: Âge osseux
Bpm	: Battement par minute
BMI	: Body Mass Index
CBG	: Corticosteroid Binding Globulin
CNPE	: Centre National de Préparation de l'élite
CMJ	: Contremouvement Jump
[CP])	: Créatine Phosphate
CRH	: Corticotrophin Releasing Hormone
DEF	: Défenseur
DEF C	: Défenseur Central
DEF L	: Défenseur latéral
FC	: Fréquence cardiaque
FCmax	: Fréquence Cardiaque maximale
GB	: Gardien de but
GE	: Groupe expérimental
GH	: Homme de croissance
GH-BP	: Growth hormone-binding protein
GH-IH	: Growth hormone-inhibiting hormone

GH-RH	: Growth hormone-releasing hormone
[gly]	: Glycogène musculaire
GnRH	: Gonadotropin releasing hormone (gonadolibérine)
GPS	: Global position system
GT	: Groupe Témoin
IGF	: Insulin-like Growth Factors ou Somatomédines
IGF-I	: Insulin-like growth factor I
IGFBPs	: Insulin-like growth factor binding protein
IGFBP3	: Insulin-like growth factor binding protein3
IMC	: Indice masse corporelle
Inter	: Internationale
INF	: Institut National de Football
[K ⁺]	: Concentration en potassium
[La]	: Lactatémie
LH	: Hormone lutéisante
LH-RH	: Luteinizing Hormone Releasing Hormone
MIL	: Milieu
MC	: Masse corporelle
MG	: Masse grasse
NS	: Non sélectionnés
PMA	: Puissance maximale aérobie
PMAan	: Puissance maximale anaérobie
Pro	: Professionnel
RPE	: Rating of Perceived Exertion

RSA	: Repeated Sprint Ability
S	: Sélectionné
SHBG	: Sex Hormone Binding Globulin
SqJ	: Squat Jump
%G	: Pourcentage des graisses
VMA	: Vitesse maximale aérobie
VO2	: Consommation d'oxygène
VO2max	: Consommationmaximaled'oxygène
YOYOIR1	:Yo-Yo intermittent recovery test level 1

Liste des tableaux

- Tableau 1 : Données anthropométriques de footballeurs danois (Reilly, 1990)
- Tableau 2 : Caractéristiques anthropométriques des joueurs professionnels appartenant aux quatre championnats les plus connus au monde selon les postes (Angleterre, Espagne, Italie et Allemagne) selon Bloomfield et al. (2005)
- Tableau 3 : Données anthropométriques de footballeurs évoluant en 1^{er} ligue anglaise (Hencken et al. 2006)
- Tableau 4 : Données anthropométriques de jeunes footballeurs espagnols (Gil et al. 2007)
- Tableau 5 : Données anthropométriques de jeunes footballeurs Français (Le Gall, 2002 et Le Gall et al. 2010)
- Tableau 6 : Caractéristiques anthropométriques associées à la réussite dans le milieu du football professionnel (Gil et al. 2007)
- Tableau 7 : Caractéristiques anthropométriques des jeunes footballeurs (Le Gall et al. 2010)
- Tableau 8 : Les différentes distances totales relevées au cours d'un match selon les auteurs
- Tableau 9 : Les différentes allures selon le poste et le niveau (en km) (Verheijen, 1998)
- Tableau 10 : Les différentes allures selon le niveau (en km) (Bangsbo, 1994)
- Tableau 11 : Distance totale parcourue en sprint au cours d'un match selon les auteurs
- Tableau 12 : Distances parcourues en mètres durant un match selon l'intensité et les postes occupés (Rampinini, 2007)
- Tableau 13 : Comparaison de l'activité des joueurs selon les postes et durant chaque mi-temps (Di Salvo et al. 2007)
- Tableau 14 : Performances lors d'un sprint selon les auteurs(s)
- Tableau 15 : Performance lors d'un saut suivant les auteurs
- Tableau 16 : Les valeurs obtenues lors de tests anaérobies chez des jeunes footballeurs
- Tableau 17 : Les valeurs obtenues lors de tests anaérobies chez des footballeurs internationaux
- Tableau 18 : Performance en détente verticale chez des jeunes footballeurs.
- Tableau 19 : Performance en détente verticale chez des jeunes et des adultes footballeurs
- Tableau 20 : Tableau récapitulatif des caractéristiques du football professionnel
- Tableau 21 : FC moyenne au cours d'un match de football selon différents auteurs

Tableau 22 : Valeurs de $VO_2\text{max}$ chez des footballeurs selon les auteurs

Tableau 23 : Données relatives au potentiel aérobie de footballeurs fréquentant les sélections françaises et l'INF Clairefontaine

Tableau 24 : Valeur de lactatémie au cours d'un match de football selon différents auteurs

Tableau 25 : L'estimation de la charge perçue de l'effort (RPE) utilisée par les joueurs pour classifier l'intensité perçue de chaque session d'entraînement (Foster et al. 2001)

Liste des figures

- Figure 1 : Distance totale parcourue en fonction des différents déplacements (Whiters et al. 1982)
- Figure 2 : Valeurs de FC moyennes au cours d'une rencontre
- Figure 3 : Evolution de la FC au cours d'une rencontre (Balsom et al. 1991)
- Figure 4 : Analyse de la FC avec la lactatémie
- Figure 5 : Exemple d'une semaine type d'entraînement des jeunes footballeurs élités
- Figure 6 : Calendrier du protocole expérimental (cinq périodes)
- Figure 7 : Protocole expérimental de l'étude pour une période de suivi

INTRODUCTION GENERALE

Le football est le sport le plus populaire dans le monde, surtout chez les enfants et les adolescents (Reilly et al. 2000 ; Malina et al. 2000 et 2004). Ce sport est considéré comme une activité multifactorielle. En effet, la performance dépend des paramètres techniques, tactiques, physiques, physiologiques et psychologiques (Bangsbo, 1994). Pour accéder au plus haut niveau avec succès, une condition physique très bien développée est nécessaire (Stolen et al. 2005; Castagna et al. 2010). Ainsi, l'optimisation du potentiel physique des jeunes footballeurs est l'un des principaux objectifs des académies de football et des centres de formation. En effet, le jeune footballeur élite doit être prêt à effectuer et à supporter des charges élevées d'entraînement observées au niveau de l'élite. L'investissement économique énorme dans ce processus exige des méthodes objectives pour la sélection et le développement des talents (Francisco et al. 2011). Dans la perspective d'une évaluation objective du potentiel des jeunes joueurs de football, les données relatives à l'anthropométrie et au potentiel physique semblent nécessaires. Toutefois, le processus de détection / sélection, souvent réalisé à un âge précoce, est affecté par la maturation pubertaire.

Pour mesurer la performance dans le football certaines variables sont souvent retenues. On y retrouve la condition physique, la technique et la performance tactique (Rösch et al. 2000). Les qualités physiques des joueurs de football sont généralement mesurées en termes d'endurance, de vitesse, de puissance et de force (Hoff, 2005). Il est relativement facile de tester la condition physique des jeunes joueurs, mais la tâche la plus difficile, c'est de faire la différence entre les adaptations liées à l'entraînement de football et à la croissance induite par le développement (Vänttinen et al. 2011).

L'observation et la caractérisation de certains paramètres anthropométriques (taille, masse corporelle, % de masse grasse), physiologiques et physiques (consommation maximale d'oxygène, performance en sprint, en détente...) chez les jeunes joueurs de football permettent de distinguer les joueurs élités des non élités (Jankovic et al. 1993; Reilly et al. 2000; Gil et al. 2007a). Elles permettent aussi de déterminer, au moins, un profil de référence en fonction de la position de jeu (Gil et al. 2007b, Wong et al. 2009) ou la catégorie d'âge (Le Gall et al. 2010 ; Wong et al. 2009 ; Carling et al. 2012).

En Europe, en Amérique Latine ou encore en Asie de nombreuses études se sont intéressées à étudier les caractéristiques anthropométriques, physiologiques et physiques des

jeunes joueurs élites pour essayer de déterminer un profil type (Gil et al. 2007b ; Le Gall et al. 2010 ; Wong et al. 2009 ; DaSilva et al. 2008 ; Sporis et al. 2011 ; Jastrzębski et al. 2012 ; Carling et al. 2012). Toutefois, la majorité de ces études ne disposaient pas de groupes contrôles ce qui ne permet pas de distinguer les effets de l'entraînement de ceux de la maturation pubertaire et ainsi s'appuyer sur leurs données. De plus, à notre connaissance, il n'existe aucune étude longitudinale qui s'est intéressée à l'effet de l'entraînement de football en Afrique sur les paramètres physiques et anthropométriques. Cette étude semble nécessaire pour fournir des informations relatives aux réponses à l'entraînement footballistique de l'élite nord-africaine et d'établir un profil type du joueur en fonction du poste de jeu.

Par ailleurs, il est actuellement bien admis que le développement et la croissance des enfants et des adolescents sont affectés positivement par la pratique sportive (Roemmich et al. 2001 ; Mackelvie et al. 2002). Néanmoins, les mécanismes expliquant les effets respectifs de l'entraînement physique et de la croissance normale sur le développement de l'organisme ne sont pas complètement bien élucidés. L'efficacité de l'entraînement physique sur la performance et l'adaptation physique dépend de la charge d'entraînement et de la capacité de l'individu à s'adapter à cet entraînement. Un entraînement peu ou trop intense pourrait avoir un effet négatif sur la performance et le développement harmonieux de l'individu. Par conséquent, trouver des mesures objectives pour quantifier l'équilibre entre la charge d'entraînement et la tolérance de l'athlète semblent être indispensables (Nemet et Eliakim, 2010).

Chez l'adulte, il a été montré que l'entraînement sportif intense est souvent associé à des perturbations endocriniennes (Tanskanen et al. 2011). De même, l'homéostasie cellulaire ainsi que le développement pubertaire normal peuvent être altérés par un entraînement physique intense combiné à une restriction calorique chez les jeunes athlètes (Roemmich et al. 2001 ; Adiyaman et al. 2004). De plus, le préjudice à long terme ou le bénéfice d'un entraînement intense chez les adolescents n'est pas bien connu (Roemmich et al. 2001).

La croissance et la maturation pubertaire chez les enfants et les adolescents sont réglées en grande partie par les axes somatotrope et gonadotrope (Adiyaman et al. 2004 ; Souberbielle, 2003). L'exercice physique joue un rôle important dans la régulation de ces axes en augmentant la sécrétion hormonale (Kanaley et al. 1997 ; Kraemer et Ratamess, 2005). Toutefois, les données de la littérature concernant les réponses et les adaptations

endocriniennes à l'entraînement physique sont divergentes (Weltman et al. 1997 ; Zaccaria et al. 1999 ; Maimoun et al. 2004).

Dans le domaine du football, très peu d'études se sont intéressées aux réponses et aux adaptations hormonales à la pratique de ce sport et tout particulièrement chez les jeunes adolescents en période pubertaire (Hansen et al.1999; Mejri et al 2005; Vääntinen et al. 2011 ; Da Silva et al. 2010). De plus, dans la majorité de ces études, le manque d'un groupe témoin ne permet pas de différencier les effets de l'entraînement de football de ceux relatifs à la croissance normale (Bouix et al. 1997). Ainsi, des données relatives aux effets à long terme de l'entraînement de football intense sur les adaptations hormonales chez les joueurs adolescents élités sont manquantes.

Par conséquent, les objectifs principaux de ce travail de thèse sont :

- ✓ D'étudier l'évolution des caractéristiques anthropométriques et des performances physiques chez des jeunes footballeurs élités tunisiens en fonction du poste occupé sur le terrain,
- ✓ D'analyser, durant une saison footballistique, l'évolution des caractéristiques anthropométriques et des performances physiques chez des jeunes footballeurs élités tunisiens en comparaison à des sujets contrôles de même âge biologique,
- ✓ D'identifier les réponses des hormones impliquées dans la croissance (GH, IGF-1 et IGFBP-3) en fonction de la charge d'entraînement chez des jeunes joueurs footballeurs élités et des sujets contrôles non-sportifs de même âge biologique sur une période de 2 ans,
- ✓ D'étudier les réponses des hormones impliquées dans l'anabolisme (testostérone, SHBG) et dans le catabolisme (cortisol) en fonction de la charge d'entraînement chez des jeunes joueurs footballeurs élités et des sujets contrôles non-sportifs de même âge biologique sur une période de 2 ans.

REVUE DE LA LITTÉRATURE

I. ANALYSE DE L'ACTIVITE FOOTBALL

Dans un premier temps, il semble fondamental d'analyser l'activité d'un footballeur en situation de compétition. Ceci permettra de mieux comprendre l'activité dans laquelle il se situe et d'en déduire ainsi les prés requis à la pratique du football de haut niveau, puis, par la suite situer les caractéristiques anthropométriques et physiologiques correspondantes.

Elément clé de la réussite, l'analyse de l'activité du footballeur est le fondement même de la compréhension de l'activité qui régie les dispositifs d'entraînements observés de nos jours. Elle est aujourd'hui étayée par des outils technologiques de qualité, tels que les systèmes d'analyse vidéo-informatique de la performance (Amisco, Sport UniversalProcess®, Nice, France ; ProZone®, Leeds, United Kingdom). Ces derniers, désormais largement répandus, permettent de multiples analyses de la performance des joueurs, aussi bien sur le plan technico-tactique que sur le plan physique.

I.1 Profil anthropométrique du footballeur

Le football, comme beaucoup d'autres sports a beaucoup évolué au cours des dernières années. Le paramètre athlétique a pris une dimension non négligeable au fil du temps. Le footballeur moderne est au-delà de ses qualités footballistiques un réel athlète de haut niveau sur le plan technique, tactique, mentale et physique. Ainsi, la pratique du football de haut niveau requiert un très haut niveau de performances physiques (Stølen et al. 2005). L'observation et la caractérisation des paramètres anthropométriques et des qualités physiques permettent de distinguer les joueurs élites des amateurs, et de dégager un profil de référence en fonction du poste occupé sur le terrain. Ces profils s'avèrent spécifiques chez les joueurs élites adultes (Bangsbo, 1994).

L'analyse de l'activité nous permet donc de mieux définir ce qu'est le football et quelles sont les réponses physiologiques à cette pratique au plus haut niveau. Les paramètres anthropométriques représentent aussi des facteurs pouvant être déterminants pour le footballeur professionnel.

Nous allons nous intéresser dans le prochain chapitre à décrire les paramètres anthropométriques des footballeurs de haut niveau adultes et jeunes adolescents.

1.1.1 Chez l'adulte

Différents travaux ont eu pour objet l'étude des caractéristiques anthropométriques de footballeurs puisque la taille, la masse corporelle et sa composition sont des facteurs qui affectent la performance en football et en sport de manière plus générale.

Chez les adultes, Reilly et al. (2000) ont étudié neuf équipes Danoises de niveau professionnel, ils rapportent que les gardiens de but ainsi que les défenseurs centraux sont les sujets les plus grands et les plus lourds (Tableau1). La spécificité des rôles est une fois encore fortement suggérée par les valeurs extrêmes, concernant la taille des sujets, observées dans cette étude : 1,90 m et 1,67 m. En observant la sélection Danoise, championne d'Europe en 1992, Bangsbo (1994) confirme ces propos et établit alors que les défenseurs centraux sont les plus grands et les plus lourds (1,88m pour 85kg), les arrières latéraux sont les plus petits et les plus légers (1,78m pour 67kg) alors que les milieux et les attaquants présentent un profil relativement homogène. Plus récemment, Bloomfield et al. (2005) ont analysé la taille, la masse corporelle et l'indice de masse corporelle (IMC) des joueurs issus de quatre grands championnats européen : la Bundesliga allemande, la Liga espagnole, la Première « League » anglaise et le Calcio italien, et ce, en fonction du poste. Ils observent que les gardiens sont les plus grands et les plus lourds et possèdent des valeurs d'IMC les plus élevées ($1,87 \pm 0,04$ m, $82,2 \pm 6,2$ kg, $23,4 \pm 1,4$ kg.m²) suivis des défenseurs ($1,82 \pm 0,05$ m, $76,2 \pm 5,7$ kg, $23,0 \pm 1,1$ kg.m²), des attaquants ($1,81 \pm 0,06$ m, $75,2 \pm 6,2$ kg, $23,0 \pm 1,2$ kg.m²) et des milieux de terrain qui sont les plus petits et les plus légers ($1,79 \pm 0,05$ m, $72,9 \pm 5,3$ kg, $22,8 \pm 1,2$ kg.m²) (Tableau2).

Des différences anthropométriques notables peuvent être observées en fonction du pays ou encore du continent. Chaouachi et al. (2010) ont mentionné dans leurs études que des footballeurs d'élites adultes ont une taille de 181 ± 5 cm, une masse corporelle de $73,2 \pm 4,1$ kg et un %G de $11 \pm 2,4$. Quant à Owen et al. (2012), ils ont signalé que des Footballeurs Européens professionnels âgés de $24,5 \pm 3,45$ ans, ont une taille de $181,1 \pm 5,78$ cm; et une masse corporelle de $78,7 \pm 7,67$ kg et de même, Scott et al. (2012) ont indiqué que des footballeurs professionnels Portugais, âgés de $24,9 \pm 5,4$ ont une masse corporelle de: $77,6 \pm 7,5$ kg et une taille de: $181,1 \pm 6,9$ cm.

Il semble qu'il y ait pour certains postes tout du moins, des prés requis anthropométriques quant à la pratique du football de haut niveau.

Tableau 1 : Données anthropométriques des Footballeurs Danois (Reilly et al, 2000).

Postes	Taille (cm)	Masse corporelle (kg)
GB	190	87,8
DEF C	189	87,5
DEF L	179	72,1
MIL	177	74
ATT	178	73,9

GB :Gardien de but ; DEF C :Défenseur central ; DEF L :Défenseur latéral ; MIL :Milieu ; ATT :Attaquant.

Tableau 2 : Caractéristiques anthropométriques des joueurs professionnels appartenant aux quatre championnats les plus connus au monde selon les postes (Angleterre, Espagne, Italie et Allemagne) (Bloomfield et al. 2005)

Position	Angleterre	Espagne	Italie	Allemagne	Totale
AGE (ans)					
Gard de but	28,2 ± 5,5	27,3 ± 4,0	27,2 ± 6,0	26,9 ± 5,5	27,4 ± 5,3
Défenseur	26,7± 4,6	27,0± 4,0	26,9± 4,2	26,5± 4,2	26,8± 4,3
Milieu	25,6 ±4,6	26,4 ±4,2	26,2 ±3,8	26,7 ±4,5	26,2 ±4,3
Attaquant	25,6± 4,8	25,6± 3,4	25,3± 4,4	26,6± 4,4	25,8± 4,2
Total	26,3 ±4,8	26,5 ±4,0	26,4± 4,4	26,6 ±4,4	26,4 ±4,4
TAILLE(m)					
Gard de but	1,88 ± 0,04	1,85 ±0,04	1,86 ± 0,04	1,89 ± 0,04	1,87 ± 0,04
Défenseur	1,82 ± 0,06	1,80 ±0,05	1,81 ± 0,05	1,84 ± 0,05	1,82 ± 0,05
Milieu	1,79 ± 0,05	1,79 ±0,05	1,78 ± 0,05	1,79 ± 0,06	1,79 ± 0,05
Attaquant	1,81 ± 0,06	1,79 ±0,06	1,81 ± 0,06	1,82 ± 0,06	1,81 ± 0,06
Total	1,81 ± 0,06	1,80 ± 0,06	1,81± 0,05	1,83 ± 0,06	1,81± 0,06
M C(kg)					
Gard de but	83,3 ±6,9	81,1±4,3	79,1±5,5	85,5±6,0	82,2±6,2
Défenseur	76,3 ±6,6	75,5±5,2	74,9±4,8	78,4±5,2	76,2±5,7
Milieu	72,0±6,0	73,6±4,6	71,7±4,4	74,3±5,4	72,9±5,3
Attaquant	74,6±6,5	73,8±6,4	75,2±5,3	77,3±6,4	75,2±6,2
Total	75,3 ±7,3	75,0 ±5,6	74,3 ±5,4	77,5 ±6,4	75,5 ±6,3
IMC					
Gard de but	23,5±1,7	23,6±1,0	22,8±1,2	23,9±1,2	23,4±1,4
Défenseur	23,0±1,3	23,2±1,1	22,9±1,0	23,1±1,1	23,0±1,1
Milieu	22,6±1,4	23,0±1,2	22,7±1,1	23,1±1,0	22,8±1,2
Attaquant	22,9±1,5	23,0±1,3	22,9±1,0	23,3±1,1	23,0±1,2
Total	22,9±1,5	23,1±1,1	22,8±1,1	23,2±1,1	23,0±1,2

A la lumière de ces différentes données, on remarque que les équipes professionnelles se caractérisent par des différences anthropométriques parmi les membres de l'équipe. Cela s'explique essentiellement par la spécialisation des rôles et les fonctions accordées à chaque poste de jeu. Les joueurs les plus grands sont les gardiens de but. Ces derniers sont également les plus lourds. Les défenseurs centraux sont généralement les joueurs les plus grands et les plus lourds dans le champ de jeu. Hencken et al. (2006) ont avancé le fait que les différences anthropométriques au sein d'une équipe permettent la multiplicité des options de jeu.

En 2006, Hencken et al ont étudié les caractéristiques anthropométriques d'une équipe de première ligue anglaise (Tableau 3). 39 mesures anthropométriques sont effectuées. Ces auteurs n'observent aucune différence selon le poste occupé. Ceci pourrait éventuellement représenter un désavantage puisque il est impossible d'apporter un impact athlétique supplémentaire lorsque cela est nécessaire. De plus, cela induirait un manque de richesse dans les options de jeu.

Tableau 3: Données anthropométriques de footballeurs évoluant en 1^{er} ligue Anglaise (Hencken et al. 2006).

Postes	Taille (cm)	Masse corporelle (kg)
GB	185	86,3
DEF	180	82,5
MIL	178	78,3
ATT	180	80,9

GB : Gardien de but ; DEF : Défenseur ; MIL : Milieu ; ATT : Attaquant

1.1.2. Chez l'enfant et l'adolescent

L'augmentation des caractéristiques anthropométriques (taille, masse corporelle, masse musculaire) explique au moins en partie l'amélioration de la performance sportive de l'enfance et l'adolescence à l'âge adulte. En effet, plusieurs études montrent une forte augmentation des performances physiques avec l'accroissement des dimensions corporelles (Blimkie et al. 1988; Mercier et al. 1992; Doré et al. 2001 ; Martin et al. 2004; Lago-Peñaset al. 2011). Ainsi, Mercier et al. (1992) ont observé des corrélations significatives entre les

mesures anthropométriques durant la croissance et les puissances maximales chez des garçons de 11 à 19 ans.

Pour déterminer dans quelle mesure, un ou une jeune athlète présente des caractéristiques typiques de son âge, on doit pouvoir comparer ces caractéristiques à celles d'un échantillon représentatif pour l'âge et le sexe (Borms, 1996). L'observation et la caractérisation des paramètres anthropométriques et des qualités physiques permettent de distinguer les joueurs élités des amateurs, et de dégager un profil de référence en fonction du poste occupé sur le terrain. Ces profils s'avèrent spécifiques chez les joueurs élités adultes (Bangsbo, 1994), en revanche, chez les jeunes joueurs, il s'avère complexe de dégager ce type de profil, du fait du peu de données provenant de sujets élités recensées dans la littérature scientifique (Wong et al. 2009).

En d'autres termes, les variations dans la taille du corps, les capacités fonctionnelles et les compétences motrices sont très particulières au cours de la puberté, et la capacité de performance actuelle de certains joueurs est souvent étroitement liée à leur état de maturité (Malina et al. 2005 ; Philippaerts et al. 2006). La composition des organes de jeunes subit des changements rapides au cours de la poussée de croissance, qui se produit chez les garçons à l'âge d'environ 14 ans (Malina et al. 2004). Au cours de cette poussée de croissance, la taille augmente d'environ (10 cm) et la masse corporelle de (10 kg) en moyenne chez des adolescents masculins (Tanner, 1975).

L'évolution de la taille et du masse corporelle des jeunes footballeurs au cours de la puberté se révèle être similaire à celle de la population générale. La seule différence se trouve généralement dans la composition du corps puisque les jeunes footballeurs ont tendance à être plus minces que la moyenne d'âge des autres jeunes (Baxter-Jones et al. 1995 ; Hansen et al. 1999).

Ainsi, l'interprétation des données anthropométriques chez les jeunes footballeurs est beaucoup plus complexe. Néanmoins certains auteurs ont apporté une contribution significative à cet objet d'étude. Gil et al. (2007b) ont démontré que dans un club amateur, ce sont les gardiens de but qui sont les plus lourds ($73,95 \pm 7,9\text{kg}$) et qui se démarquent significativement des joueurs de champ dont la masse corporelle est relativement homogène ($68,55 \pm 9,3\text{kg}$). Les gardiens de but possèdent aussi les plus grandes tailles ($179,5 \pm 5,9\text{ cm}$) devant les défenseurs ($175,5 \pm 7,6\text{ cm}$), les attaquants ($174,8 \pm 6,8\text{cm}$) et les milieux de

terrain ($174,7 \pm 7,6\text{cm}$) (tableau 4). Dans le même contexte, Sporis et al. (2009) mentionnent que les gardiens de but sont les joueurs possédant la masse corporelle et la taille les plus élevées et que les défenseurs ont un pourcentage de masse grasse plus élevé que les attaquants et les joueurs du milieu de terrain.

Wong et al. (2009) ont publié, eux aussi, les caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs (U14) élites chinois, ils observent que les attaquants se distinguent significativement des autres joueurs (entre 52,2 et 56,2 kg) par leur masse corporelle qui est la plus faible ($43,9 \pm 9,5\text{kg}$). Il en est de même pour la taille puisqu'ils sont aussi les plus petits ($156 \pm 11\text{cm}$), les autres joueurs oscillent entre 165 ± 8 et $169 \pm 6\text{cm}$. En France, Le Gall, (2002) et Le Gall et al. (2010) ont observé ces mêmes caractéristiques chez les membres des sélections Françaises, des jeunes aux adultes, et celles des joueurs passés par l'Institut National du Football (INF) situé à Clairefontaine (tableau 5). Dans une revue de questions, DaSilva et al. (2008) indiquent les caractéristiques anthropométriques des joueurs brésiliens : les U17 mesurent en moyenne $174,5 \pm 4,5\text{cm}$ et pèsent $65 \pm 5,5\text{kg}$. Ces derniers semblent être moins athlétiques que les joueurs européens, alors que Mujika et al. (2009) ont observé que des footballeurs élites âgés de $18,3 \pm 0,6$ ans ont une taille de $177 \pm 4\text{ cm}$, et une masse corporelle de $71,4 \pm 6,9\text{ kg}$.

Tableau 4 : Données anthropométriques de jeunes footballeurs espagnols (Gil et al. 2007b).

Postes	Taille (cm)	Masse corporelle (kg)	Masse grasse % MG	Indice Masse corporelle
GB	179,5	73,95	12,22	22,85
DEF	175,47	68,86	11,65	22,31
MIL	174,69	68,46	11,85	22,38
ATT	174,83	68,35	10,95	22,24

GB :Gardien de but ; DEF :Défenseur ; MIL :Milieu ; ATT :Attaquant

Tableau 5 : Données anthropométriques des jeunes footballeurs Français
(Le Gall, 2002 ; Le Gall et al. 2010).

Catégorie	N	Masse corporelle	Tailles	Masse grasse	Masse maigre
INF 13 ans	184	49,1±8,6	161,4±9,2	12,5±0,9	43±6,3
INF2 14 ans	175	58,9±7,5	170,7±8,3	12,8±0,8	51,4±6,7
INF3 15 ans	160	64,6±7,4	174,1±8,2	12,7±0,8	56,4±6,6
Fin INF3 16ans	160	66,3±7,2	175,7±8,2	12,8±0,9	57,8±6,5
U 16	124	63,4±8,2	172,4±8,0	12,9±0,7	55,2±7
U 17	132	70,8±7,3	177,4±6,5	12,5±0,8	62±7,6
U 18	115	73,1±6,7	177,8±6,3	11,9±0,8	64,4±7,4
U 19	142	76,2±6,0	178,7±6,2	12,2±0,8	66,9±6,4
Espoirs	115	77,1±5,9	181,5±6,0	11,7±0,8	68,1±5,7
A	68	81,5±7,2	183,2±7,1	11,3±0,8	72,3±6,8

En 2007, Gil et al ont décrit les caractéristiques anthropométriques associées à la réussite dans le milieu du football professionnel (tableau 6). Deux facteurs anthropométriques ressortent particulièrement de cette étude : la taille et la masse corporelle.

Tableau 6 : Caractéristiques anthropométriques associées à la réussite dans le milieu du football professionnel (Gil et al. 2007a)

Age (ans)	Taille (cm)		Masse corporelle (kg)		IMC	
	NS	S	NS	S	NS	S
14	165,5	172,1	57,4	60,4	20,6	20,4
15	175,6	174,2	65,6	67,6	21,3	22,3
16	175,3	177,2	71,0	72,5	31,1	23,1
17	176,5	177,8	73,8	74,0	23,6	23,4

NS : Non sélectionné, S : Sélectionné

Selon Le Gall et al. (2010), l'anthropométrie est un paramètre qui influence la probabilité d'une carrière professionnelle ou non, au même titre que les paramètres physiologiques, la maturation ou encore la période de naissance. En effet, au vue des chiffres recensés dans cette étude, on constate que la masse corporelle est un facteur qui permet de

distinguer l'international de l'amateur, tout comme la taille et la masse grasse : ce ne sont ici que des tendances (tableau 7).

Tableau 7 : Caractéristiques anthropométriques des jeunes footballeurs Le Gall et al. (2010)

	U14			U15			U16		
	Inter	Pro	Ama	Inter	Pro	Ama	Inter	Pro	Ama
MC (kg)	52,5	53,8	50,8	59,3	60,3	58,8	65,3	66	58,8
Taille (cm)	165,2	165	162,1	171,5	170,8	169,1	176,1	175,3	169,1
MG%MC	11,9	12,5	12,4	11,6	13	12,6	11,3	12,6	12,6

Inter : International ; Pro : Professionnel ; Ama : Amateur.

Jankovic et al. (1997), observent chez les équipes nationales croates moins de 15 ans et moins de 17 ans que les joueurs ayant obtenu un contrat professionnel sont les sujets les plus grands et possédant des paramètres physiologiques favorables. En revanche, Franks et al. en 1999, ont observé eux qu'il n'y a pas de différences anthropométriques entre les joueurs de l'équipe nationale Anglaise moins de 16 ans qui ont devenu pros et ceux qui ne l'ont pas devenu. Cela peut s'expliquer par le fait que tous ces joueurs étaient physiquement performants.

Castagna et al. en 2010, ont signalé chez 80 jeunes footballeurs masculins élites âgés de $14,4 \pm 0,1$ ans, que la taille et la masse corporelle sont de $167 \pm 4,8$ cm et de $53,6 \pm 1,8$ kg respectivement. Quant à Sporis et al. (2011), ils enregistrent une taille moyenne de $175,4 \pm 6,61$ cm et une masse corporelle moyenne de $63,6 \pm 8,06$ kg pour des jeunes footballeurs croates élites âgés de 14-15 ans. Dans une nouvelle étude, Lago-Peñas et al. (2011) ont établi les profils anthropométriques et physiologiques des jeunes joueurs Espagnoles âgés de $15,6 \pm 1,8$ ans en fonction de leur position de jeu. Ils ont démontré que sur le plan anthropométrique, les milieux extérieurs étaient plus maigres et plus courts. En revanche, les défenseurs centraux et les Gardiens ont été jugés les plus grands et les plus lourds ainsi qu'ils ont également eu les pourcentages de masse grasse les plus élevés. Dans une étude plus récente, Jastrzębski et al. (2012), mentionnent aussi que des jeunes footballeurs élites Polonais âgés de $16,61 \pm 0,31$ ont une taille de $176,58 \pm 5,98$ cm et une masse corporelle de $64,28 \pm 6,42$ kg.

Selon tous ces auteurs, des facteurs tels que la taille, la masse corporelle ou encore la composition sont susceptibles d'influencer la réussite ou non d'une carrière au haut niveau. C'est pourquoi il aurait été intéressant de comparer ces différentes populations en fonction de leur stade de maturation pubertaire pour éviter tous les artefacts et biais méthodologiques et toutes les interprétations erronées. Les résultats des recherches sur la façon dont la composition corporelle des jeunes joueurs contribue à leurs possibilité de réussite en football n'est pas entièrement compatible, mais certains éléments de preuve montrent que les joueurs qui sont plus avancés en termes de croissance morphologique sont avantagés dans le processus de sélection (Panfil et al. 1997 ; Gil et al. 2007a).

Résumé

Pour les adultes la plus part des études mentionnent que sur le plan Européen (Allemagne, Angleterre, Italie, Espagne, Danemark), les gardiens de but sont les plus grands et les plus lourds et possèdent les valeurs d'IMC les plus élevées suivis des défenseurs, des attaquants et des milieux de terrain qui sont les plus petits et les plus légers. Les joueurs Allemands sont les plus grands et les plus lourds suivis des Anglais, des Italiens et enfin des Espagnoles. Ces joueurs Européens qui ont une moyenne d'âge de $26,4 \pm 4,4$, ont une taille moyenne de $181 \pm 0,06$ m et une masse corporelle moyenne de $75,5 \pm 6,3$ kg. Ces valeurs sont similaires à celles des footballeurs Tunisiens professionnels surtout au niveau de la taille (Chaouachi et al. 2010). Si au niveau des adultes la caractérisation des paramètres anthropométriques permettent de distinguer les joueurs élites des amateurs, et de dégager un profil de référence en fonction du poste occupé sur le terrain (Bangsbo, 1994), chez les jeunes joueurs, il s'avère complexe de dégager ce type de profil, du fait du peu de données provenant de sujets élites recensées dans la littérature scientifique (Wong et al. 2009). Vu que la composition des organes de jeunes subit des changements rapides au cours de la poussée de croissance, qui se produit chez les garçons à l'âge d'environ 14 ans (Malina et al. 2003), les chercheurs se sont intéressés à étudier les caractéristiques anthropométrique des jeunes par catégorie d'âge, par exemple en France Le Gall et al. (2010) ont analysé l'anthropométrie (masse corporelle en kg et taille en cm) des jeunes footballeurs élites (U13 à U18). Ils observent les valeurs suivantes : U13 ($49,1 \pm 8,6 / 161,4 \pm 9,2$), U14 ($58,9 \pm 7,5 / 170,7 \pm 8,3$), U15 ($64,6 \pm 7,4 / 174,1 \pm 8,2$), U16 ($66,3 \pm 7,2 / 175,7 \pm 8,2$), U17 ($70,8 \pm 7,3 / 177,4 \pm 6,5$) et U18 ($73,1 \pm 6,7 / 177,8 \pm 6,3$). D'autres auteurs dans d'autres pays ont eux aussi, analysé les caractéristiques anthropométriques de leurs jeunes footballeurs élites comme en Espagne Mujika et al. (2009) qui ont signalé que des footballeurs élites âgés de $18,3 \pm 0,6$ ans ont une

taille de 177 ± 4 cm, et une masse corporelle de $71,4 \pm 6,9$ kg. En Pologne, Jastrzębski et al. (2012) ont rapporté que des jeunes footballeurs âgés de $16,61 \pm 0,31$ ans, avaient une taille de $176,58 \pm 5,98$ cm et une masse corporelle de $64,28 \pm 6,42$ kg. En Croatie, pour Sporis et al. (2011), des jeunes footballeurs croates élites, âgés de 14-15 ans, avaient une moyenne de taille de $175,4 \pm 6,61$ cm et une moyenne de masse corporelle de $63,6 \pm 8,06$ kg. Alors qu'au Brésil, Silva et al. (2008), ont indiqué que des U17 mesurent en moyenne $174,5 \pm 4,5$ cm et pèsent $65 \pm 5,5$ kg. Enfin en Chine Wong et al. (2009) ont montré que pour des U14 chinois, la taille oscillent entre 165 et 169 cm alors que la masse corporelle entre 52,2 et 56,2 kg. Ce qu'il faut remarquer d'après ces résultats, que les jeunes footballeurs élites Européens possèdent des caractéristiques anthropométriques presque similaires. Les U17 Brésiliens semblent être moins athlétiques que les joueurs européens, alors que les chinois U14 ont la plus petite taille et la plus petite masse corporelle par rapport aux autres. Aucune étude, à notre connaissance, ne s'est intéressée aux caractéristiques anthropométriques des jeunes joueurs élites Africains et plus spécialement Nord Africains afin d'établir un profil anthropométrique type en fonction du poste.

I.2 Analyse des distances parcourues et de leurs intensités au cours d'un match

De nombreuses études ont été menées chez le joueur adulte concernant la distance parcourue au cours d'une compétition de football ainsi que sur les différentes intensités observées en cours de match (Tableau 8). Les études issues de la littérature internationale (Bangsbo et al. 2006 ; Di Salvo et al. 2007 ; Rampinini et al. 2007a) se sont accordées pour affirmer qu'un joueur de football parcourt entre 10 et 13 km lors d'une rencontre. Presque les mêmes distances sont trouvées par Grayet Jenkins, (2010) chez des joueurs Australiens, 12,31 km pour les joueurs du milieu de terrain, 11,92 km pour les attaquants et 11,88 km pour les défenseurs.

Le gardien, lui, effectue entre 5 et 6 km par match (Di Salvo et al. 2008). On savait déjà que les meilleurs joueurs internationaux couraient davantage en match que les autres joueurs professionnels de première division (Mohr et al. 2003). Mais il existe aussi une corrélation entre la distance parcourue à haute intensité en match (à une allure supérieure à la Vitesse Maximale Aérobie) et les tests de VMA ou même de capacité à répéter des sprints (RSA) (Rampinini et al. 2007b).

Di Salvo et al. (2009) ont indiqué que les défenseurs courent moins que les avant-centres et les attaquants alors que Buchheit et al. (2010) ont mentionné que les latéraux font plus de sprints répétés que les défenseurs centraux. Pour autant, il serait faux de croire que les défenseurs sont forcément en moins bonne condition physique que les attaquants. Au niveau des qualités physiques pures, à haut niveau, on ne retrouve pas de différences "interpositions" (gardiens, défenseurs, centraux, attaquants), que ce soit lors des tests de vitesse de sprint 30m (Taskin et al. 2008) ou de VMA (Buchheit et al. 2010). De plus, chez les défenseurs centraux, les meilleurs au test VMA ne sont pas ceux qui courent la plus grande distance à haute intensité (> VMA) en match (Rampinini et al. 2007b).

Tableau 8 : Les différentes distances totales relevées au cours d'un match selon les auteurs.

Auteurs	Niveau	Distance parcourue (m)
Gamblin et Winterbottom (1952)	Professionnel anglais	3 361
Agnevik (1970)	Professionnel suédois	10 200
Saltin (1973)	Amateur suédois	12 000
Whitehead (1975)	Professionnel anglais	11 700
Smaros (1980)	2 ^{ème} division finlandaise	7 100
Withers et al. (1982)	Sélection australienne	11 500
Eklblom (1986)	Amateur suédois	10 000
Gerisch et al. (1988)	Amateur allemand	9 000
Van Gool et al. (1988)	Universitaires belges	10 300
Reilly (1994 et 1996)	2 ^{ème} division anglaise	9 660
Bangsbo (1994)	International danois	10 550
Rienzi et al. (2000)	International Amérique du Sud	8 638
Helgerud et al (2001)	International Norvégien junior	9 107
Mohr et al. (2004)	Professionnel	10 333
Hawkins (2004)	Professionnel	15 000
Di Salvo et al. (2007)	Professionnel	11 393
Barros et al. (2007)	Professionnel	10 012
Rampinini et al. (2007a)	Professionnel	10 802

Si l'analyse de la distance totale parcourue est un indicateur pertinent de la performance en football, la distance parcourue en course de haute intensité semble être cruciale (Bangsbo, 1994, Di Salvo et al. 2007) (Tableau 9, 10 et Figure 1). C'est en effet à

l'issue de ce type de course que se présente des occasions pour inscrire un but ou défendre son propre camp. Plusieurs études indiquent qu'une course de haute intensité est une course dont la vitesse est supérieure ou égale à $19,8\text{km.h}^{-1}$ (Rampinini et al. 2007a, Rampinini et al. 2007b ; Di Salvo et al. 2007). La quantité d'actions de haute intensité effectuée au cours d'un match permet notamment de distinguer les joueurs en fonction de leurs niveaux de jeu (Bangsbo et al. 2006). Cette distance fluctue entre 800 et 930m par match (Rampinini et al. 2007a, Rampinini et al. 2007b ; Di Salvo et al. 2007). La distance en sprint est elle aussi déterminante quant à l'issue du match : elle varie entre 110 et 350m, le plus souvent chez des footballeurs professionnels (Rampinini et al. 2007 ; Di Salvo et al. 2007) mais peut atteindre jusqu'à 650m chez des internationaux (Mohr et al. 2003 ; Bangsbo et al. 2006) (Tableau 11).

Les exigences physiques sont également variables d'un poste à l'autre : en effet, on constate que ce sont les milieux de terrains qui parcourent la plus grande distance totale, alors que la plus petite distance est parcourue par les défenseurs centraux. Il n'existe pas de différences significatives entre les différents postes à une intensité inférieure à 11km.h^{-1} . En revanche, au-delà de celle-ci et notamment en sprint, les défenseurs présentent constamment une distance parcourue inférieure à celle des autres groupes (Tableau 12).

Toutefois, la majorité des études n'utilisent pas les mêmes protocoles pour effectuer les différentes mesures. C'est pourquoi Bloomfield et al. (2004) ont mis en place une classification détaillant très précisément l'activité individuelle des sujets dans les activités dynamiques. Celle-ci s'applique avec pertinence au football et permet la formalisation et la comparaison de différentes données. Néanmoins, le traitement de celles-ci demeure long et fastidieux (Bloomfield et al. 2007).

Peu d'analyses de l'activité de jeunes footballeurs ont été menées. Ce phénomène s'explique probablement par le coût élevé de ces explorations. Néanmoins, Castagna et al. (2003) ont, à l'aide de deux caméras, analysé l'activité de jeunes footballeurs ($11,8 \pm 0,6$ ans) au cours d'une rencontre (60 minutes). Extrapolée sur une durée de 90 minutes, la distance totale parcourue s'approche de 8800m. La distance moyenne parcourue est de $6175 \pm 318\text{m}$. Comme chez les professionnels celle-ci diminue par rapport à la 1^{ère} mi-temps (-5,5%). Les courses de haute intensité représentent 9% de l'activité totale ce qui est proche des valeurs indiquées chez les professionnels (8,6%) (Bangsbo et al. 1991). Ces jeunes joueurs effectuent aussi 33 ± 4 courses de haute intensité d'environ 2 secondes et ce, toutes les 2 minutes environ. Dans une étude plus récente Castagna et al. (2010) ont démontré que des jeunes footballeurs

âgés de $14,4 \pm 0,1$ ans ont couvert une distance 6.087 ± 582 m dont 15% (930 ± 362 m) ont été réalisées comme une activité à haute intensité.

Buchheit et al. (2008) ont analysé l'activité de jeunes footballeurs (U14) élite à l'aide de système GPS (Global Positioning System) lors d'un match 11 contre 11 de 2 fois 40 minutes. La distance totale parcourue est de 5372 ± 125 m ce qui est extrapolée à 90 minutes correspond à environ 6500 m. Ils constatent également une diminution de la distance parcourue lors de la seconde période qui est essentiellement de faible intensité (61-70% FCmax) alors que cette dernière se situe majoritairement entre 86 et 95% de FCmax lors de la première mi-temps. Cela semble étayer la thèse de l'apparition de la fatigue.

Tableau 9 : Les différentes allures selon le poste et le niveau (en km) selon Verheijen (1998)

	International junior A			Professionnel					
	Def	Mil	Att	Def		Mil		Att	
				C	L	Déf	Off	Point	Sout
Marche	3	1,9	4,6	4,2	2,8	2,4	2,2	4,4	2,2
Trot	2,5	5,9	2,2	2,7	4,2	9,4	6,8	2,1	5
Course	1,2	1,2	1	0,5	1,3	0,6	2,6	1,3	0,6
Sprint	0,9	0,8	1,4	0,5		0,6		0,9	

Def : Défenseur ; Mil : Milieu ; Att : Attaquant ; Def C : Défenseur central ; Def L : Défenseur latéral ; Mil Déf : Milieu défensif ; Mil Off : Milieu offensif ; Att Point : Attaquant de pointe ; Att Sout : Attaquant soutien

Tableau 10 : Les différentes allures selon le niveau (en km) selon Bangsbo (1994).

International Danois	1ère Ligue anglaise	
Arrêt	7 minutes	
Marche	3,4	3,2
Trot	2,2	2,4
Course lente	3,2	3,1
Course moyenne	1,3	1,2
Course rapide	0,6	0,7
Sprint max	0,4	0,3
Marche arrière	0,4	0,35

Figure1 : Distance totale parcourue en fonction des différents déplacements
Selon Whithers (1982)

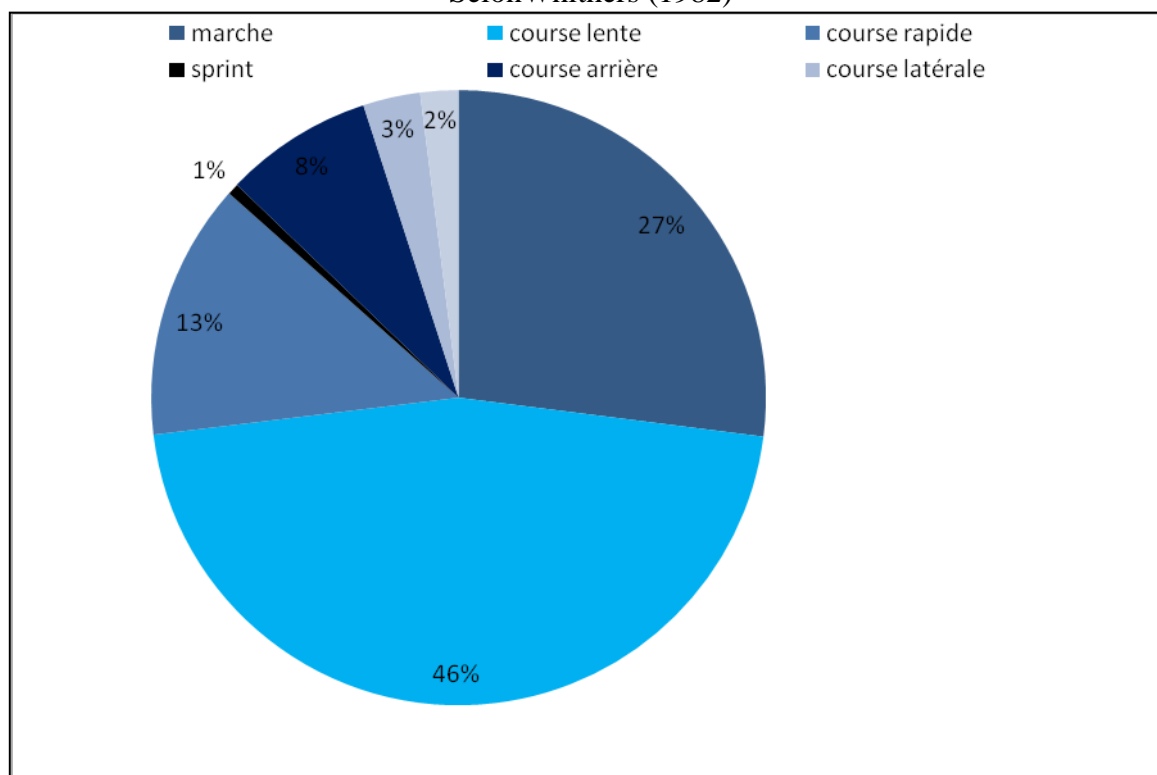


Tableau 11 : Distance totale parcourue en sprint au cours d'un match selon les auteurs.

Auteurs	Niveau de pratique	Distance parcourue en sprint en mètres
Knowles et Brooke 1974)	Professionnel anglais	520
Thomas et Reilly. (1979)	Professionnel anglais	783
Whithers et al. (1982)	Sélection australienne	946
Van Gool et al. (1988)	Universitaires belges	867
Ohashi et al. (1988)	Professionnel japonais	589
Bangsbo et al. (1991)	Professionnel danois	300
Rienzi et al. (2000)	International sud américain	345
Castagna et al. (2003)	Jeunes amateurs italiens	468
Mohr et al. (2003)	Professionnel italien	650

Tableau 12 : Distances parcourues en mètres durant un match selon l'intensité et les postes occupés (Rampinini et al 2007a)

	Distance parcourue	Distance parcourue en marche 0-7,2km/h	Distance parcourue en course de faible intensité 7,2 -14,4km/h	Distance parcourue en course de moyenne intensité 14,4-19,8km/h	Distance parcourue en course de haute intensité 19,8-25,2km/h	Distance parcourue en sprint > 25,2km/h
DC	9995	3846	1458	278	76	18
DL	11233	3504	1601	211	123	31
ML	11748	3341	1726	467	118	24
A	10 233	3844	1361	321	95	27

DC:Défenseur central ; DL : Défenseur latéral ; MA : Milieu axial ; ML : Milieu latéral ; A :Attaquant

Analyse par mi-temps

L'analyse détaillée de chaque mi-temps donne des indications assez intéressantes. Di Salvo et al. (2007) ont comparé l'activité selon les postes et par mi-temps. Aucune différence significative n'est relevée concernant la distance parcourue en sprint entre la 1^{ère} et la 2^{ème} mi-temps. Di Salvo et al. (2007) ont précisé que si des différences en terme de distances totales parcourues peuvent exister entre la 1^{ère} et la 2^{ème} mi-temps, en revanche, ces dernières ne concernent que très peu les footballeurs professionnels. Toutefois, on assiste à une diminution significative de la distance effectuée à haute intensité entre ces deux périodes ($459 \pm 97\text{m}$ vs. $446 \pm 97\text{m}$).

Au contraire, Verheijen (1998) avait relevé une diminution de 125m entre la distance parcourue en sprint au cours de la 1^{ère} (621m) et la 2^{ème} mi-temps (496m) : ce qui constitue une diminution de 11,2%. De même, pour les données relatives aux distances parcourues (autre que le sprint) ce même auteur a observé une diminution de la distance parcourue de l'ordre de 9% passant de 5934m en 1^{ère} mi-temps à 4954m en 2^{ème} mi-temps.

Tableau 13 : Comparaison de l'activité des joueurs selon les postes et durant chaque mi-temps (Di Salvo et al. 2007)

	Distance parcourue (en m)	Distance parcourue entre 0 &1 km/h	Distance parcourue entre 11.1 & 14km/h	Distance parcourue entre 14.1 & 19km/h	Distance parcourue entre 19.1 & 23km/h	Distance parcourue à plus de 23km/h	Distance parcourue avec la balle	% de la distance parcourue en possession de la balle par rapport à la distance totale
DC	10 627	7080	1380*	1257	397	215	119	1,2
DL	11 410	7012	1590	1730	652	402	220	1,9
MA	12 027	7061**	1965*	2116*	267	248	230	1,9
ML	11 990	6960**	1743*	1987	738	446	286	2,4
A	11 254	6958	1562*	1683	621	404	212	1,9

*différence significative : valeur > en 1^{ère} mi-temps ; ** différence significative : valeur < en 2^{ème} mi-temps.

Résumé

La distance parcourue, par match, par les footballeurs adultes de haut niveau a évolué considérablement, elle est passée de 3,361km pour des professionnels anglais (Gamblin et Winterbottom, 1952) à 13km (Di Salvo et al. 2007) et même parfois à 15 km (Hawkins, 2004). La quantité d'actions réalisées à haute intensité fluctue entre 800 et 930m par match (Rampinini et al. 2007a) et la distance en sprint varie entre 110 et 350m (Di Salvo et al. 2007) et peut atteindre 650m chez des internationaux (Mohr et al. 2003). Cette évolution montre que le football a beaucoup évolué non seulement sur le plan technico-tactique ou encore en ce qui concerne les outils technologiques de qualité qui sont utilisés pour l'analyse des matchs et de la performance mais aussi sur le plan physique. Par ailleurs, chez les jeunes footballeurs très peu d'études se sont intéressés aux distances parcourues et ne rapportent pas les mêmes données. Ainsi, Castagna et al. (2003;2010) enregistrent une distance totale qui s'approche de 8800m et rapportent que les courses réalisées à haute intensité représentent 9% de l'activité totale. Alors que pour Buchheit et al. (2008) rapportent des distances plus faibles chez des jeunes footballeurs (U14), 6500m en 90 minutes.

I.3 Analyse des sprints et des sauts

En football, le métabolisme énergétique majoritaire est le métabolisme aérobie, il n'empêche que le métabolisme anaérobie joue un rôle déterminant dans cette activité. En effet, les actions brèves et intenses requièrent un important débit énergétique en un temps très bref : pour en assurer la fourniture, l'organisme fait appel à la voie des phosphagènes. C'est au cours de ces actions intenses que les différences s'observent : celles-ci déclenchent une prise de pouvoir permettant de se retrouver dans une situation favorable : c'est notamment le cas lors d'un débordement sur l'aile pour éliminer un adversaire direct en étant plus rapide, d'une frappe de la tête en sautant plus haut que l'adversaire, d'un changement de direction à la suite d'une feinte, d'une frappe de balle surpuissante. Ces exemples multiples nous montrent à quel point le métabolisme anaérobie donne tout son sens à l'activité.

On distingue généralement deux types d'actions intenses en football : les courses et les sauts.

Selon Verheijen (1998), la distance parcourue en sprint peut s'approcher du kilomètre au cours d'une rencontre de football, ce qui représente jusqu'à 11% de la distance totale parcourue. Bangsbo (1994) lui dénombrait en moyenne 8 duels de la tête par match : là aussi une donnée importante. Thorpe et Sunderland (2012) ont mentionné dans leur étude que des footballeurs semi-professionnels ont effectué 39 ± 18 sprints au cours du match.

Pour apprécier l'évolution de la Puissance Maximale Anaérobie (PMAAn) au cours de la croissance chez le footballeur à travers deux tests, de vitesse et de détente, une étude a été effectuée sur cinq ans au Centre Technique National Fernand Sastre de Clairefontaine, et qui a concernée 328 jeunes footballeurs de 11 à 18 ans de l'Institut National du Football (INF) (Le Gall et al. 2010). La PMAana été mesurée à partir d'un test de vitesse sur 40 mètres et d'un test de détente verticale. C'est l'âge osseux et non l'âge civil qui a été pris comme référence. Les résultats ont montré que les gains en PMAAn les plus importants sont notés entre 13 et 14 ans (47 %). Ils sont significatifs jusqu'à 16 ans (38 % entre 14 et 16 ans), mais la valeur maximale est atteinte à 18 ans d'âge osseux. Entre 12 et 16 ans, la valeur de la PMAAn est multipliée par 2,29 pour la vitesse et 1,81 pour la détente. En conclusion, les auteurs estiment que la mesure de la PMAAn au cours d'un test de vitesse de 40 mètres est tout à fait adaptée au footballeur, tout comme le test de détente verticale. La détermination de l'âge osseux apparaît indispensable chez l'enfant et l'adolescent pour interpréter au mieux cette mesure.

Une autre étude menée par McMillan et al. (2005), a démontré que pour des jeunes footballeurs (âge, $16,9 \pm 0,4$), un travail de 10 semaines, de 4 minutes de conduite de balle à haute intensité autour d'une piste spécialement conçue est efficace pour améliorer les interférences force, capacité de saut et performance de sprint. Le squat jump et le contremouvement jump ont significativement augmenté, passant de $37,7 \pm 6,2$ à $40,3 \pm 6$ cm et de $52,0 \pm 4,0$ à $53,4 \pm 4,2$ cm, respectivement ($p < 0,05$). Dans le même sens, Dellal et al. (2010) ont démontré que des exercices intermittents effectués sous forme de changement de direction (180°) induisaient une augmentation de la sollicitation du métabolisme anaérobie. Vaeyens et al. 2006 ont constaté au cours d'une étude réalisée sur 4 groupes de joueurs de football d'âges différents (U13, U14, U15 et U16), que les joueurs d'élites étaient plus performants que les joueurs non-élites en ce qui concerne la force, la souplesse, la vitesse, l'endurance aérobie, la capacité anaérobie ainsi que plusieurs habilités techniques. Les analyses ont montré que la vitesse de course et les habilités techniques sont les caractéristiques les plus importantes chez les joueurs U13 et U14, tandis que l'endurance cardiorespiratoire a été plus importante chez les joueurs U15 et U16. Les résultats suggèrent que les caractéristiques discriminantes varient avec les niveaux d'âges. Dans le même contexte, Gravina et al. 2008 ont montré que la performance en sprint a été le facteur le plus important associé à la sélection ou non dans les premières équipes des joueurs âgés entre 10 et 14 ans.

Le développement de la force des joueurs de football pendant la puberté est moins étudié que la vitesse ou l'endurance, mais les observations suggèrent que les jeunes joueurs de football possèdent une plus grande force par rapport à celle de la population moyenne au cours de la puberté (Baxter 1996, Capranica, 1992). Alors que Gil et al. (2007b) et dont le but d'établir les profils physiologiques des jeunes joueurs de football (âge : $17,31 \pm 2,64$ ans) en fonction de leur position de jeu, et de déterminer leur pertinence pour le processus de sélection, ils ont montré que les attaquants ont enregistré les meilleurs résultats dans tous les tests physiologiques, y compris l'endurance, la vitesse, l'agilité et la puissance. Dans le processus de sélection, l'agilité et les tests de saut étaient les plus discriminants pour les attaquants. En revanche, l'agilité, et l'endurance sont les facteurs clés pour les milieux de terrain. Ainsi, ces différences correspondent à leur charge de travail au cours des matchs analysés. Par conséquent, les programmes de formation devraient inclure des séances spécifiques selon les postes des joueurs. Dans le même contexte, Sporis et al. (2009) ont signalé que les gardiens de but sont excellents dans les tests de sauts. Par contre, ce sont aussi les joueurs qui obtiennent les moins bons résultats aux tests de sprint sur 10 et 20 mètres.

Les attaquants sont les joueurs les plus rapides sur 5, 10 et 20 mètres. Par rapport aux défenseurs et aux attaquants, les joueurs du milieu de terrain se distinguent par leur vitesse de pointe.

Lago-Peñas, et al. (2011) ont démontré que chez des jeunes footballeurs (âge : 15,63 \pm 1,82) et selon leurs postes que les plus lourds et plus grands ont réalisé les meilleurs résultats dans les sauts verticaux et les sprints sur 30 m, tandis que les joueurs les plus maigres ont obtenu de meilleurs résultats dans le test de 20 m course progressive pour estimer la VO_2 max. Tandis que Sporis et al. (2011) n'ont pas observé de différences significatives concernant les performances de puissance des joueurs footballeurs croates (âge : 14-15 ans) en fonction de leurs postes. Le très jeune âge et le début de carrière très court de ces joueurs peuvent, au moins en partie, expliquer ces résultats.

Toujours dans le thème d'analyse des sprints et des sauts, Jovanovic et al. 2011 ont évalué les effets de la vitesse, l'agilité et la rapidité sur les performances de puissance chez des footballeurs élites. La performance de puissance a été évaluée grâce à un test de rapidité (sprint sur 5 m), un test d'accélération (sprint sur 10 m), des tests de vitesse maximale (sprints sur 20 et 30 m), et des sauts continus effectués avec les jambes tendues (SqJ et CMJ). Ils ont conclu que le programme d'entraînement proposé semble être un moyen efficace pour améliorer la performance de puissance des jeunes footballeurs.

De même Sedano et al. (2011), ont montré que la force explosive des jeunes footballeurs élites âgés de 18,2 \pm 0,9 ans est améliorée suite à un programme d'entraînement de 10 semaines à base de pliométrie. Au cours d'une étude plus récente, Jastrzębski et al. (2012) mentionnent que le niveau de vitesse et des sauts de 99 jeunes footballeurs (âge: 16,61 \pm 0,31 ans) a augmenté de façon significative après 150 séances d'entraînements au cours d'une saison. Quant à Haugen et al. (2012) ont comparé les sprints et la performance en CMJ des footballeurs Norvégiens en fonction de leurs niveaux, de leurs postes et de leurs âges sur une période de 15 ans. 939 athlètes (âge : 22,1 \pm 4,3 ans), y compris les joueurs de l'équipe nationale, ont été testés en sprint 40m et en CMJ au Centre olympique d'entraînement entre 1995 et 2010. Les joueurs internationaux et les joueurs de 1^{ère} division étaient plus rapides ($p < 0,05$) que les joueurs de 2^{ème} division (de 1,0 à 1,4%) et de la 3^{ème} à la 5^{ème} division (3,0 à 3,8%). Les attaquants étaient plus rapides que les défenseurs (1,4%), que les milieux de terrain (2,5%) ou encore les gardiens (3,2%) ($p < 0,001$). Les milieux de terrain ont sauté ~ 2,0 cm moins haut que les autres joueurs ($p < 0,05$). Ces auteurs rapportent aussi que la meilleure

performance en sprint est atteinte entre 20 et 28 ans et diminue de façon significative par la suite ($p < 0,05$).

De nombreux auteurs se sont intéressés aux valeurs correspondantes à des performances anaérobies. Aussi bien les données issues de courses (Tableau 14), ou encore les données issues de sauts (Tableau 15).

Tableau 14 : Performances lors d'un sprint selon les auteurs(en s)

Etudes	Niveau pays	5m	10m	15m	20m	30m	40m
Cometti et al. 2001	Division 1/ France		1,80±0,06			4,22±0,19	
	Division 2		1,82±0,06			4,25±0,15	
	Amateur		1,9±0,08			4,30±0,14	
Dupont et al. 2004	International/ France						5,55±0,15
	Après entraînement						5,35±0,13
Gorostiaga et al. 2004	Jeunes/ Espagne	0,95		1,09			
Helgerud et al. 2001	Juniors/ Norvège		1,88±0,06		3,13±0,10		
	Division 1		1,87±0,06				
	Après entraînement		1,81±0,07		3,08±0,09		
Hoff et Helgerud, 2002	Division 2/ Norvège		1,91±0,07				5,68±0,21
	Après entraînement		1,81±0,09				5,55±0,16
Kollath et Quade, 1993	Pros/ Allemagne	1,03±0,08			3,03±0,11		
	Amateurs	1,07±0,07			3,15±0,12		
MacMillan et al. 2005	Jeunes/ Ecosse		1,96±0,06				
Mohr et al. 2004	Division 4/ Danemark					4,45±0,04	
Wisloff et al. 2004	Division 1/ Norvège		1,2±0,3		3,0±,30	4,0±0,2	

Tableau 15 : Performance lors d'un saut suivant les auteurs

Etude	Pays/niveau	N	Position	CMJ (cm)	SqJ (cm)
Adhikari et al. 1993	National/ Inde	2 4 5 7	G D M A	61 54 57,2 55,3	
Arnason et al. 2004	Elite/ Islande	8 7 16 79 70 49	G D M A	39,4 38,8 38 38,3 39,3 39,4	37,8 37 35,8 37,7 37,6 37,8
Casajus et al. 2001	Division 1/ Espagne Mi saison	15 15		47,8 46,7	
Diallo et al. 2001	12-13 ans/ France Apres entraînement	10 10		29,2 32,6	27,3 29,3
Ekblom, 1986	Elite/ Suède			59	
Faina et al. 1988	Amateurs/ Italie Pros International	17 27 10		36,9 43,5 48	34,2 40,4 45
Garganta et al. 1992	Elite jeunes/ Portugal Non élite	23		34,7 31,6	33,3 30,3
Gorostiaga et al. 2004	Jeunes/ Espagne	21		37	
Hoff et Helgerud, 2002	Division 2 / Norvège Apres entraînement	8 8		42,9 44,1	 38,6
Leatt et al. 1987	U16-18/ USA	17		53	
MacMillan et al. 2005	Jeunes/ Ecosse			50,4	40,3
Mathur et al. 1983	Elite/ Nigéria			42,7	
Tiryaki et al. 1997	Division 1/ Turquie Division 2 Division 3			60,8 54,1 57	

Le tableau 16 (si dessous) synthétise les valeurs obtenues lors de tests anaérobies à l'Institut National du Football à Clairefontaine et ce en fonction de l'année de formation. Ces tests ont été réalisés par l'intermédiaire de 5 cellules photoélectriques placées tous les 10m, depuis la ligne de départ jusqu'au 40m. Ce test, très fréquent chez le footballeur nous permet d'obtenir la puissance maximale anaérobie via la formule suivante :

$P = (1/2mv^2 + mgh) / t$ avec : m : masse corporelle en kg ; t : temps en s ; h : hauteur du centre de gravité (2^{ème} vertèbre sacrée mesurée cliniquement) en m

Tableau 16 : Les valeurs obtenues lors de tests anaérobies chez des jeunes footballeurs

	N	10m arrêté de 0 à 10m	10m lancé de 30 à 40m	40m de 0 à 40m	Puissance max anaérobie (Watts)
INF 1 (13 ans)	144	1,954±0,067	1,283±0,051	5,889±0,235	1500±199
INF 2 (14 ans)	135	1,873±0,074	1,213±0,048	5,63±0,225	2088±224
INF 3 (15 ans)	120	1,834±0,073	1,176±0,047	5,462±0,218	2520±253
Fin INF 3 (16 ans)	120	1,835±0,073	1,156±0,047	5,432±0,217	2703±270

Le tableau n°17 nous présente les mêmes données recueillies lors des mêmes tests mais cette fois effectuées auprès des internationaux.

Tableau 17 : Les valeurs obtenues lors de tests anaérobies chez des footballeurs internationaux

	N	10m arrêté 0 à 10m	10m lancé de 30 à 40m	40m de 0 à 40m	Puissance max anaérobie (Watts)
U 16	124	1,865±0,076	1,182±0,048	5,530±0,225	2502±234
U 17	132	1,840±0,073	1,162±0,047	5,443±0,217	2853±281
U 18	115	1,805±0,072	1,131±0,046	5,286±0,211	3160±324
U 19	142	1,800±0,073	1,129±0,046	5,262±0,213	3309±372
Espoirs	115	1,800±0,072	1,102±0,044	5,229±0,209	3570±384
A	68	1,785±0,075	1,100±0,045	5,201±0,209	3796±410

D'autres tests destinés à explorer le potentiel anaérobie sont également effectués pour les mêmes catégories d'âges des joueurs de l'Institut National du Football à Clairefontaine et

ce en fonction de l'année de formation (Tableau 18 et Tableau 19). C'est notamment le cas avec les différents tests de détente verticale. Parmi eux : le squat jump (SqJ), le countermovement jump (CMJ) ou encore le saut libre. Le squat jump est une séquence concentrique sans élan, les mains sur les hanches, position de départ jambes tendues. Le CMJ est une séquence pliométrique avec élan, les mains sur les hanches, position de départ jambes tendues. Le saut libre est une séquence pliométrique avec élan, les mains libres, position de départ jambes tendues. Ces tests sont souvent corrélés à la mesure de puissance maximale anaérobie en sprint. La différence entre les valeurs recueillies en SqJ et CMJ s'expliquerait par la mise en action du cycle étirement raccourcissement : on note que les différences sont faibles chez le footballeur, ce qui pourrait nous conduire à affirmer que son système viscoélastique n'est pas encore optimal.

La puissance développée au cours d'une détente verticale est calculée selon la formule suivante : $P=21.179.m\sqrt{h}$ avec m : masse corporelle en kg et h : hauteur du saut en m

Tableau 18 : Performance en détente verticale chez des jeunes footballeurs

	N	SqJ (en cm)	CMJ (en cm)	Saut libre (en cm)	Puissance (en Watts)
INF 1 (13 ans)	144	34,7±4,2	35,4±4,3	42,9±5,1	698±67
INF 2 (14 ans)	135	37,3±4,7	38,1±4,8	45,8±5,4	866±91
INF 3 (15 ans)	120	40,2±4,8	41,1±4,9	48,2±5,6	974±95
Fin INF 3 (16 ans)	120	42,3±5	42,9±5,1	50,6±5,8	1024±103

Tableau 19 : Performance en détente verticale chez des jeunes et des adultes footballeurs

	N	SqJ (en cm)	CMJ (en cm)	Saut libre (en cm)	Puissance (en Watts)
U 16	124	37,6±4,5	38,1±4,5	48,8±5,7	962±95
U 17	132	41,2±4,9	42,8±4,9	48,8±5,7	1074±105
U 18	115	42,3±5,1	42,9±5,2	52±6,2	1145±119
U 19	142	42,9±5,1	43,6±5,1	52,1±6,7	1195±123
Espoirs	115	45,4±5,2	45,8±5,2	56,4±6,7	1258±130
A	68	45,5±5,1	46,2±5,4	56,8±7	1329±142

Résumé

Dans le football moderne, le métabolisme énergétique majoritaire est le métabolisme aérobie, mais, le métabolisme anaérobie joue, également, un rôle déterminant dans cette activité. C'est au cours des actions intenses surtout pendant les duels (Bangsbo, 1994) tels que les sprints (Thorpe et Sunderland, 2012) que les différences s'observent entre les joueurs. En effet, la plus part des études se sont penchées sur l'analyse de ces facteurs déterminant dans la pratique footballistique, en montrant que pour les adultes, les performances en sprints et en sauts sont meilleures chez les internationaux que chez les professionnels ou encore les amateurs (Faila et al. 1999). Ces performances peuvent différencier un joueur élite d'un non-élite (Garganta et al. 1992) ou encore les joueurs de divisions différentes (Cometti et al. 2001). Ces qualités footballistiques peuvent être améliorées suite à un programme d'entraînement spécifique quelque soit le niveau des joueurs (Helgerud et al. 2001; Hoff et Helgerud, 2002). Pour les jeunes joueurs, Gravina et al. (2008) ont montré que la performance en sprint a été le facteur discriminant le plus important chez les joueurs âgés de 10 et 14 ans. Il a été montré qu'un programme d'entraînement basé sur le développement de la vitesse, l'agilité et la rapidité semble être un moyen efficace pour améliorer la puissance des jeunes footballeurs (Jovanovic et al. 2011; Sedano et al. 2011). Comme chez les adultes, les joueurs élités de différents âges (U13, U14, U15 et U16), étaient plus performants que les joueurs non-élités sur le plan de la force et de la vitesse ainsi qu'en ce qui concerne plusieurs compétences techniques (Vaeyens et al. 2006). Par conséquent, ces qualités peuvent être des facteurs déterminants dans le choix des postes des joueurs (Sporis et al. 2009; Lago-Peñas et al. 2011).

La plus part des études effectués et qui s'intéressent aux qualités de vitesse et des sauts chez les jeunes footballeurs sont des études transversales et dans la plus part des cas on ne trouve pas de groupe contrôle pour voir l'effet de la maturation pubertaire sur les résultats obtenus.

I.4. Analyse physiologique des exigences du Football

La compréhension des mécanismes et des réponses physiologiques à une rencontre de football est nécessaire pour élaborer des dispositifs d'entraînement adapté aux joueurs. S'il existe d'autres paramètres significatifs tels que la concentration de glycogène musculaire

([gly]), de créatine phosphate ([CP]), le pH musculaire ou encore la concentration en potassium ($[K^+]$), la fréquence cardiaque (FC), la consommation d'oxygène (VO_2) et la lactatémie ([La]) sont les principaux témoins de ces réponses observées en football.

Tableau 20: Données récapitulatives des caractéristiques du football professionnel:

	Défenseurs centraux	Défenseurs latéraux	Milieux	Attaquants	Moyenne	Intensité Cible
Distances totales en match	10627	11410	12000	11254	11323	-
Distance marche	3082	3195	2880	3151	3077	-
Distance (7-11km/h)	4296	3841	4191	3833	4040	60% VMA
Distance (11-14Km/h)	1380	1590	1850	1562	1596	75% VMA
Distance (14-19Km/h)	1257	1730	2050	1683	1680	100% VMA
Distance (19-23Km/h)	397	652	682	621	588	120% VMA
Distance Sprint >23Km	215	402	347	404	342	Max
Nombre de Sprint	18	31	24	27	25	-
Distance moyenne des sprints	12	13	14	15	14	-
Vitesse maxi des sprints	33.9	35.5	35.0	38.0	35.6	-
Distance maxi d'un Sprint	56	56	63	53	57	-
Total course	7545	8215	9120	8103	8246	-

Suite du Tableau 20

VO ₂ max moyenne des joueurs	63 ml/min/kg
Moyenne temps de jeu	55mn soit 18 km/h
Moyenne temps de jeu	55mn soit 18 km/h
Moyenne distance maxi en sprint	57m
Distance course arrière	643.2m
Baisse distance totale entre 1er et 2eme mi-temps	-7%
Lactatémie max	9.7 mmol/l
Lactatémie moyenne	5.3 mmol/l
% Vo ₂ max en match	70/75%
Demi-tours	50
Tacles	13
Sauts	10
temps entre 2 courses	5sec
Dribles par match	30
Durée de dribble	2.9 sec
Temps de récupération après un sprint	90 sec
% du temps <73% FC max	11%
% du temps entre 73% et 92% FC max	63%
% du temps >92% FC max	26%

1.4.1 La fréquence cardiaque (FC)

Le football a évolué sur le plan physiologique. Il n'y a qu'à observer l'évolution des adaptations cardiovasculaires des joueurs à l'effort en match (Dellal et al. 2008), et à l'entraînement (Kelly et Drust, 2009). Des travaux de Seliger (1968) sur la variabilité cardiaque des joueurs (124 ; 206 bpm) et Agnevik (1970) (162 et 188bpm), qui comptent parmi les premières études réalisées au cours des matchs de football, aux travaux de Mohr et al. (2004) (160 bpm), on a pu grâce à l'évolution des outils de mesures plus performants (cardiofréquencemètres et autres), obtenir des résultats valides et beaucoup plus crédibles.

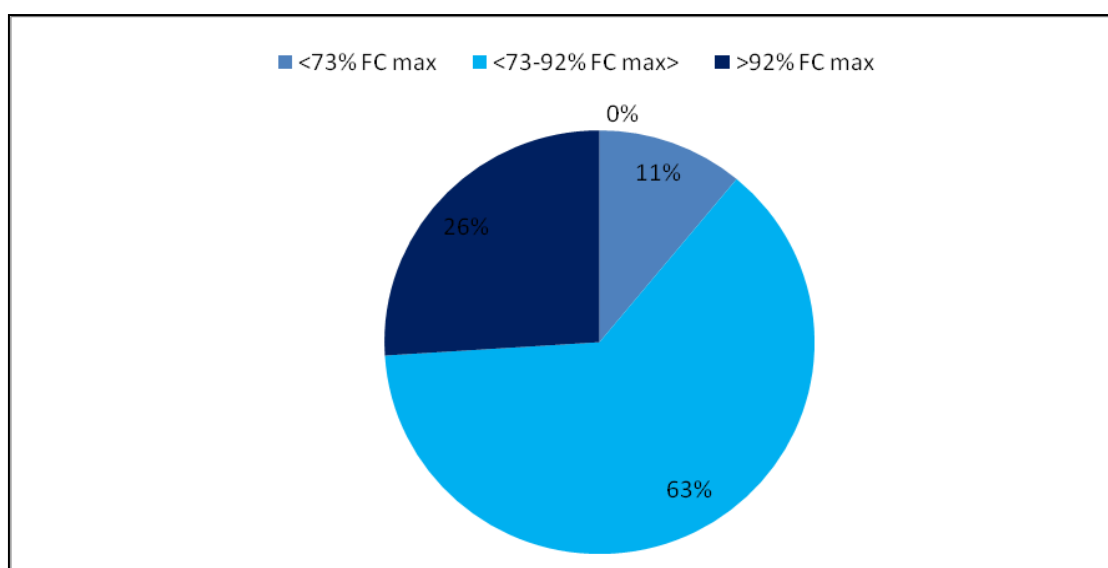
A ce jour, l'International Football Association Board (IFAB, instance qui détermine et fait évoluer les règles du football) n'autorise pas le port de cardiofréquencemètre durant les rencontres officielles. Cependant, Stolen et al. (2005), dans une revue de questions, indiquent que la FC moyenne du footballeur se situe entre 80 et 90% de FCmax. Elle oscille entre 150 et 190 battements par minute (Bangsbo, 1994). Ces données seraient issues de rencontres amicales ou de matchs tests (Tableau21). Il paraît primordial de disposer de données générales plus précises telles que les valeurs maximales de FC par exemple.

D’après une étude de Rhodes et Epersen (1988) qui ont analysé quantitativement la FC et ils ont trouvé sur une population de footballeurs danois (n=6) les résultats suivants : La FC moyenne était de moins de 73% de la FC max pour 11% du temps de jeu ; de 73% à 92% de la FC max pour 63% du temps et enfin de plus de 92% de FC max pour 26% du temps de jeu.

Tableau 21 : FC moyenne au cours d’un match de football selon différents auteurs

Auteurs	FC moyenne en bpm	% FC max	Population
Seliger (1968)	165	80	Professionnel tchécoslovaque
Agnevik (1970)	175	93	International suédois
Smodlaka (1978)	171	85	International russe
Reilly (1986)	157	72	Professionnel de 1 ^{ère} league anglaise
Van Gool et al. (1988)	169 1MT – 165 2MT	84	Joueurs universitaires belges
Ali et Farrally (1991)	168-172	-	Professionnels et amateurs Ecossais
Bangsbo (1992)	164 1MT – 154 2MT	80	International danois
Brewer et Davis (1994)	175	89/91	Professionnel suédois
Helgerud et al (2001)	-	82.2	International junior norvégien

Figure2: Valeurs de FC moyennes au cours d'une rencontre

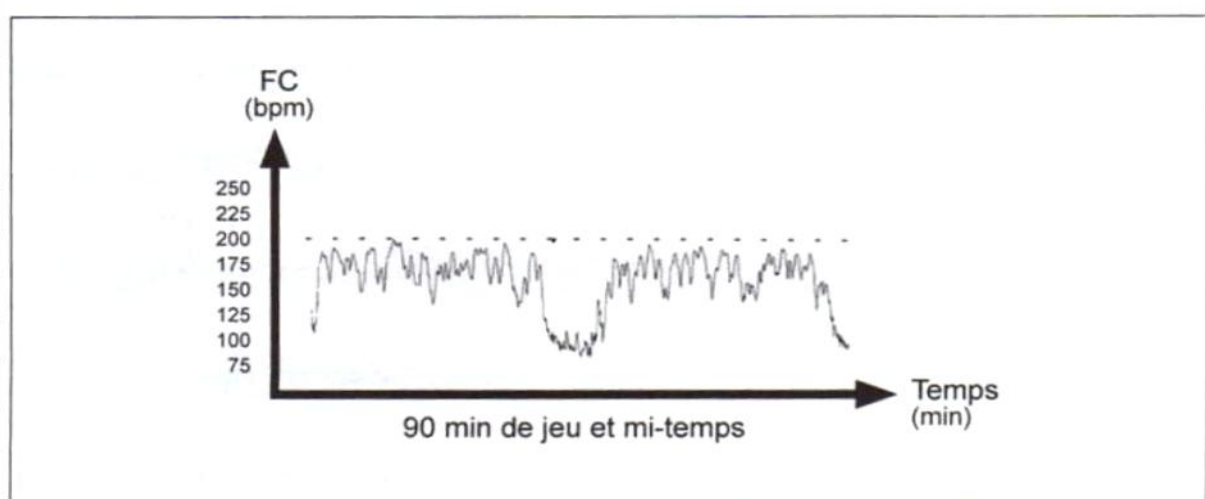


1.4.2. La consommation d'oxygène (VO₂)

Peu d'études ont mesuré la consommation d'oxygène au cours d'une rencontre. C'est notamment le cas de Ogushi et al. (1992), cette étude innovante pour l'époque s'est heurtée à des contraintes d'ordre méthodologique et technologique puisque la méthodologie utilisée (recueil des gaz expirés dans un sac de Douglas toutes les 90-150 secondes) lors de celle-ci est peu adéquate et nous fournit des données dont la fiabilité pose problème (entre 28 et 38 ml.min.kg⁻¹). Plus récemment, Gatterer et al. (2010) ont utilisé sur deux milieux de terrains amateurs lors d'une mi-temps, des analyseurs de gaz portatifs et obtiennent des VO₂ moyennes de l'ordre de 37.4±6.8 et 34.3±6.4 ml.min.kg⁻¹ ce qui correspond à 56.8 et 61.0% de leur VO₂ max respectivement. Les scientifiques estiment la VO₂ selon l'évolution de la FC au cours du match. En s'appuyant sur la relation entre la FC et VO₂, Bangsbo (1994) estime lui que l'intensité de la rencontre se situerait autour de 70% de VO₂ max. Néanmoins cette estimation semble être peu précise. Astrand et al. (2003) trouvent ainsi une activité moyenne à 85% de la FC max et ils en déduisent une activité correspondant à 75% de la VO₂ max.

Cependant, cette valeur n'est qu'une estimation, Balsom et al. (1991) ont bien montré que la FC évolue de manière non linéaire avec la VO₂ à la suite d'actions intenses nécessitant la synthèse d'ATP via les voies anaérobies (ATP- PCr et glycolyse).

Figure3: Evolution de la FC au cours d'une rencontre (Balsom et al. 1991)



Les joueurs de football de haut niveau possèdent des VO_2 max de l'ordre de 57-75 ml/min/kg (Iaia et al. 2009). Ces valeurs sont supérieures à celles de sujets sédentaires mais inférieures à celles d'athlètes endurants de haut niveau qui peuvent dépasser 90ml.min.kg⁻¹ (Höff, 2005). Les jeunes joueurs possèdent des VO_2 max assez proches de celles des joueurs professionnels comme le confirment plusieurs travaux (Helgerud et al. 2001; Le Gall 2002 ; Chamari et al. 2004 ; Impellizzeri et al. 2004;McMilan et al. 2005 ; Silva et al. 2008 ; Wong et al.2009) (Tableau 22).

Tableau 22 : Valeurs de VO_2 max chez des footballeurs selon les auteurs.

Etudes	Niveau/pays	n	position	VO_2 (en l)	VO_2 en ml/min.kg
Al-Hazzaa et al.(2001)	Elite/ Arabie Saoudite		DC	4.16	52.3
			DL	4.16	57.7
			M	4.13	59.9
			A	4.11	56.9
Bangsbo, (2006)	Elite/ Danemark	5	G	4.48	51
		13	DC	4.9	56
		12	DL	4.43	61.5
		21	M	4.63	62.6
		14	A	4.43	60
Chamari et al.(2004)	-19 élite/ Tunisie, Sénégal	34		4.3	61.1
Helgerud et al.(2001)	Juniors/ Norvège	9		4.25	58.1
Hoff et al.(2005)	Division 2/ Norvège	8		4.63	60.3
Impellizzeri et al.(2007)	Jeunes/ Italie	19		4.03	57.4
McMillan et al.(2005)	Jeunes/ Ecosse	11		4.45	63.4

La littérature fait aussi état de corrélations entre les valeurs de VO_2 max des joueurs et la distance parcourue, le nombre et la qualité des sprints (Bangsbo, 1994 ; Wisloff et al. 1998 ; Helgerud et al. 2001) expliquant l'intérêt que porte les préparateurs physiques pour ce paramètre.

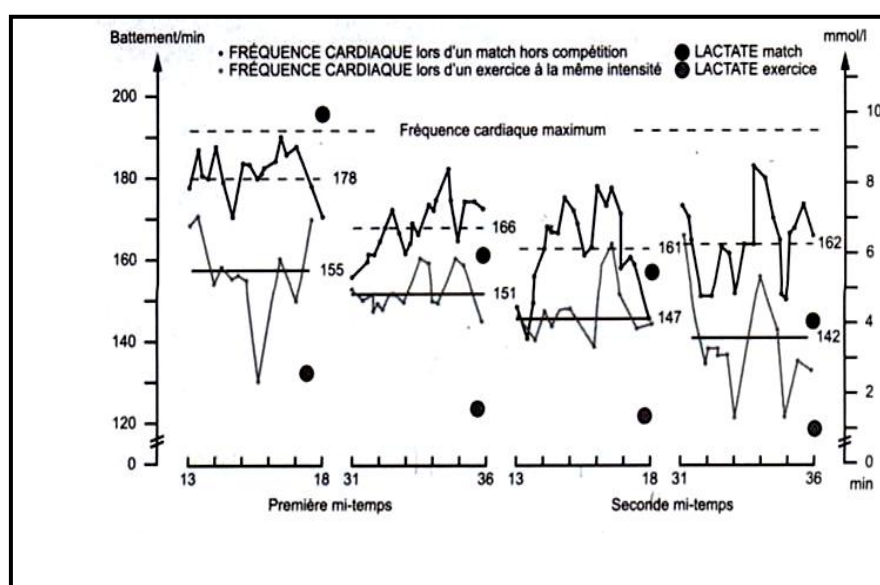
En 2002, Le Gall, médecin des sélections jeunes et de l'INF Clairefontaine publie de nombreuses données relatives au suivi longitudinal de jeunes footballeurs en formation (Tableau23).

Tableau 23 : Données relatives au potentiel aérobic de footballeurs fréquentant les sélections françaises et l'INF Clairefontaine.

	n	VMA (en km/h)	VO ₂ max (en ml/min/kg)
INF 1	144	16,4±0,7	57,4±2,9
INF 2	135	17,2±0,7	60,2±3
INF 3	120	17,5±0,8	61,3±3,2
Fin INF3	120	17,5±0,8	61,3±3,1
U16	124	16,6±0,7	58,1±2,8
U17	132	17±0,7	59±3,1
U18	115	17,3±0,8	60,6±3,2
U19	142	17,5±0,8	61,2±3,1
Espoirs	115	17,5±0,7	61,2±3,3
A	68	17,6±0,8	61,6±3,4

I.4.3. La lactatémie

Bangsbo (1994) a effectué une analyse de la cinétique de la FC et ce, couplée a celle de la lactatémie. Il observe que la valeur de lactatémie au repos est de 1,8 mmol/l, la valeur pic étant de 9,7 mmol/l au cours de la seconde période et de 3,5 mmol/l à la fin de la rencontre.

Figure4 : Analyse de la FC et de la lactatémie au cours de deux mi-temps d'un match de football (Bangsbo 1994).

En accord avec les résultats de Bangsbo, pas mal d'études qui ont démontré que les taux de lactatémie chez les footballeurs et plus élevé en première mi-temps qu'en deuxième et que de même une pique peut atteindre les 9,5 mmol/l pendant la première période du jeu, alors que les taux mentionnés vers la fin des rencontres varient entre 2.4 et 7.2 selon les différentes recherches. (Tableau 24)

Cependant, en raison de la longueur des matchs de football, il a été observé des enregistrements de concentration de lactate sanguin en fin de partie variant de 5 mmol/l à 7 mmol/l (Stolen et al. 2005).

Tableau 24 : Valeur de lactatémie au cours d'un match de football selon différents auteurs

Auteurs	Lactates en 1^{ère} mi-temps en mmol/l	Lactates en 2^{ème} mi-temps en mmol/l
Smaros (1980)	4,9	4,1
Eklblom (1986)	9,5	7,2
Rhode et Epersen (1988)	5,1	3,9
Gerisch et al (1988)	5,6	4,7
Bangsbo et al (1991)	4,9	3,7
Bangsbo (1994)	4,1	2,4
Brewer et Davis (1994)	5,1	4,6
Florida-James et Reilly (1995)	4,4	5

Résumé

Sur le plan physiologique, le football moderne a énormément évolué (Dellal et al. 2008; Kelly et Drust, 2008). La fréquence cardiaque (FC), la consommation d'oxygène (VO_2) et la lactatémie ([La]) sont les principaux témoins des réponses physiologiques observées en football. Pour la FC, Bangsbo (1994) indique qu'elle oscille entre 150 et 190 battements par minute. Mohr et al. (2004) observent eux des FC de 160 bpm. Stolen et al. (2005) indiquent que la FC moyenne se situe entre 80 et 90% de FCmax. Pour la consommation d'oxygène au cours d'une rencontre, Bangsbo (1994) estime que l'intensité de la rencontre se situerait autour de 70% de VO_2 max. Iaia et al. (2009) indiquent que des joueurs de football de haut niveau possèdent des VO_2 max de l'ordre de 57-75 ml.min.kg⁻¹. Les jeunes joueurs possèdent quant à eux des VO_2 max assez proches de celles des joueurs professionnels (Silva et al. 2008; Wong et al. 2009). Pour la lactatémie, Stolen et al. (2005) rapportent des concentrations de lactate sanguin mesurées en fin de partie variant de 5 mmol/l à 7 mmol/L. Chez des joueurs professionnels, Bangsbo (1994) indique que la lactatémie déterminée au

repos est de 1,8 mmol/l et que la valeur pic s'élève à 9,7 mmol/l au cours de la première période et de 3,5 mmol/l à la fin de la rencontre.

II. ENTRAINEMENT EN FOOTBALL

Afin que les jeunes joueurs soient en mesure d'être performants au plus haut niveau, des programmes d'entraînements spécifiques sont élaborés afin de développer les qualités d'endurance mais aussi d'explosivité et de vitesse.

II.1. Entraînement en endurance

L'entraînement en endurance peut avoir de multiples objectifs sur des paramètres relatifs à la capacité aérobie, au seuil lactique 2 ou ventilatoire 2, ou à la $\dot{V}O_2$ max.

Bien souvent, du fait des corrélations établies entre $\dot{V}O_2$ max et la distance parcourue, le nombre de sprint et le classement, on cherche à développer alors ce paramètre considéré, par ailleurs, comme le témoin de l'aptitude aérobie (Bangsbo, 1994 ; Smaros, 1980 ; Apor, 1988).

Il semble que l'exercice intermittent soit la méthode la plus utilisée pour atteindre cet objectif. Elle apparaît également comme étant la plus efficace. Chez des jeunes, Helgerud et al. (2001) indiquent qu'un exercice intermittent consistant en 4×4 minutes de courses à une intensité de 90-95% de FCmax, avec une récupération active entre les séries de 3 minutes à une intensité de 50-60% de FC max chez de jeunes joueurs élite permet une augmentation significative de la $\dot{V}O_2$ max (11%), de la distance parcourue en match (20%), des mouvements en possession de la balle (23%) ainsi que du nombre de sprints (100%) après 8 semaines d'entraînement bi hebdomadaire. Ce même protocole permet d'engendrer des gains de $\dot{V}O_2$ max proche de 10% (McMilan et al. 2005 ; Impellizzeri et al. 2006) sur une période de 10 à 12 semaines. La quantité de course de haute intensité en match est également améliorée de l'ordre de 22.8% (Impellizzeri et al. 2006).

Chez des adultes, Ferrari et al. (2008) ont utilisé une fois de plus ce protocole durant 7 semaines et observent une amélioration de $\dot{V}O_2$ max de 6.6% ainsi qu'un gain de 12.5% lors du Yo-Yo intermittent recovery test level 1. Ce protocole permet également d'améliorer l'économie de course de 3 à 7% ainsi que de réduire l'accumulation du lactate sanguin au cours d'une course sous-maximale.

L'exercice intermittent peut également être effectué en course de type navette. Dellal et al. (2009) ont examiné les réponses physiologiques entre un exercice intermittent en ligne et celles observées lors d'un exercice intermittent en navette avec un changement de direction de 180° : l'impact physiologique enregistré lors de cette modalité est significativement supérieur à celui de la course en ligne. En effet la FC de réserve, la concentration de lactate sanguin ([La]) et la RPE (Rating of Perceived Exertion) sont supérieures pour la même intensité d'exercice lors d'un 30s/30s ; 15s/15s et 10s/10s à des intensités allant de 100% à 120% de VO₂max. A ce jour, aucun protocole de ce type n'a permis d'explorer les réponses physiologiques et perceptives à ce type d'exercice chez les jeunes.

Bien que l'exercice de course intermittente constitue une méthode efficace, les jeux réduits ont également une alternative non négligeable qui permet de travailler simultanément les habiletés techniques, tactiques et la condition physique.

Rampinini et al. (2007b) montrent que l'intensité de l'exercice au cours des jeux réduits peut être manipulée en faisant varier les dimensions du terrain et les encouragements du staff technique lors de 3x3, 4x4, 5x5 et 6x6. L'intensité atteinte est comprise entre 85,7±3,4 et 89,4±2,3% de FCmax, entre 4,2±1,5 et 5,5±1,6 mmol.l⁻¹ de lactate sanguin et 6,3±1,2 et 7,6±0,5 unité de RPE. En utilisant une combinaison de ces facteurs, le coach peut moduler l'intensité de l'exercice dans la zone de haute intensité et ainsi contrôler le stimulus de l'entraînement aérobic. Le 2x2 et le 8x8 avec GB induisent des réponses cardiaques similaires à celles observées lors d'exercices intermittents courts (>80% FC de réserve). Ainsi, ces 2 jeux réduits peuvent être utilisés pour l'entraînement en endurance spécifique au football avec l'avantage d'être intégré totalement à la logique interne de l'activité. Les autres jeux réduits (4x4 et 10x10) induisent des réponses cardiaques similaires à celles du 15/15 à 100% et du 30/30 à 100% avec récupération passive (-77% de FC de réserve et -76% de FC de réserve, respectivement) (Dellal et al. 2008). Il semble qu'à l'exception de la lactatémie, les altérations de format n'affectent pas la précision des réponses physiologiques et perceptives. En outre, la récupération inter série peut favoriser la récupération physiologique entre les périodes d'effort et donc, de permettre aux joueurs de travailler à une grande intensité durant les périodes suivantes. Combinés, ces facteurs peuvent réduire la fiabilité des réponses FC et [La] aux jeux réduits intermittents comparés aux jeux réduits continus (Hill-Haas et al. 2008).

Ces résultats suggèrent que tous les jeux réduits ne peuvent pas permettre l'entraînement aérobic spécifique au football du fait de leur intensité insuffisante à stimuler

fortement le métabolisme aérobie. Il faut donc veiller à une bonne calibration de la modalité d'exercice pour induire les sollicitations physiologiques escomptées.

II.2. Entraînement en force-vitesse

Si la fourniture d'énergie en football provient principalement du métabolisme aérobie (90%) (Iaia et al. 2009), les actions déterminantes sont celles de hautes intensités. L'entraînement que l'on qualifiera de « force-vitesse » est donc une priorité : il faut que les joueurs courent plus vite, sautent plus haut, résistent le mieux aux contacts et duels et frappent plus fort dans le ballon.

Hoff et Helgerud (2002) rapportent qu'un entraînement tri-hebdomadaire d'une durée de 8 semaines consistant en 4 séries de 5 répétitions de $\frac{1}{2}$ squat à 85% de la 1-RM, avec une attention particulière accordée à la phase concentrique du mouvement, permet d'améliorer la performance en $\frac{1}{2}$ squat de 161 à 215 kg, ainsi que la performance en sprint sur 10 et 30m chez des joueurs professionnels (Helgerud et al. 2011). Wisloff et al. (2004) nous indiquent qu'il existe une forte corrélation entre la performance en sprint sur 10m ($r = 0,94$) et saut ($r = 0,78$) et la performance maximale en $\frac{1}{2}$ squat. L'entraînement en musculation au travers ces corrélations prend alors tout son sens. Il est donc préconisé de pratiquer 4 séries de 4 répétitions de $\frac{1}{2}$ squats, avec une attention particulière sur la phase concentrique, et d'augmenter la charge à chaque séance, ce qui s'avère efficace pour augmenter la force mais aussi l'économie de course. Ce type d'entraînement est basé sur des adaptations nerveuses et ne génère pas ou peu d'hypertrophie et améliore même la performance en endurance (Höff, 2005).

Chez de jeunes joueurs élites, l'addition d'un programme d'entraînement comprenant de la musculation avec charges légères (15 à 50% de masse corporelle), des sauts et des sprints ainsi que des jeux réduits induit une amélioration à court terme de la performance en sprint chez de jeunes joueurs élites, et ce après 6 semaines d'entraînement. Il semblerait que cette forme d'entraînement soit plus intéressante que la course en ligne pour l'amélioration à court terme de la performance en sprint (Mujika et al. 2009). De même, l'entraînement de force explosive tout comme l'entraînement par répétitions de sprints (Repeated Sprint Ability) permet l'amélioration de la capacité à répéter des sprints mais aussi l'amélioration de la performance sur des distances de 10 et 30m (Buchheit et al. 2010).

Il convient de préciser que toutes ces études ne présentent pas de groupe contrôle permettant d'exclure les effets de la maturation pubertaire sur les résultats obtenus. On peut alors se demander quel est l'impact de ce phénomène biologique sur les gains générés à l'issue de l'entraînement sportif.

Résumé

Chez les jeunes joueurs, plusieurs études (Helgerud et al. 2001; McMilan et al. 2005; Impellizzeri et al. 2006) montrent que des exercices intermittents permettent une amélioration significative de la VO_2 max et de la distance parcourue en match. Ferrari et al. (2008) rapportent des résultats similaires chez les footballeurs adultes. Dellal et al. (2009) ont examiné les réponses physiologiques entre un exercice intermittent en ligne et celles observées lors d'un exercice intermittent en navette avec un changement de direction montrant que l'impact physiologique enregistré est significativement supérieur à celui de la course en ligne. Rampinini et al. (2007) montrent que l'intensité de l'exercice au cours des jeux réduits peut être manipulée en faisant varier les dimensions du terrain et les encouragements du staff technique par exemple. En football, les joueurs sont appelés à courir plus vite, sauter plus hauts, résister le mieux aux contacts et duels et frapper plus fort dans le ballon. Wisloff et al. (2004) indiquent qu'il existe une forte corrélation entre la performance en sprint et la performance maximale en $\frac{1}{2}$ squat. Egalement, Hoff et Helgerud (2002) rapportent qu'un entraînement en $\frac{1}{2}$ squat permet d'améliorer la performance en sprint sur 10 et 30m chez des joueurs professionnels. Mujika et al. (2009) indiquent une amélioration à court terme de la performance en sprint suite à un entraînement comprenant de la musculation avec charges légères (15 à 50% de masse corporelle), des sprints et des jeux réduits. De même, Buchheit et al. (2010) ont rapporté des résultats similaires en utilisant l'entraînement par répétitions de sprints (RSA).

III. ADOLESCENCE, DEVELOPPEMENT BIOLOGIQUE ET FOOTBALL

III.1. Adolescence et développement biologique

Les rôles positifs de la pratique sportive dès l'enfance sont indéniables aussi bien pour un développement psychique harmonieux que pour l'acquisition de la coordination, de l'équilibre, de la masse osseuse ou de la force musculaire (Castagna et al. 2010). Cependant pratiqué en excès ou dans de mauvaises conditions, le sport peut être délétère pour la santé

chez cette population en pleine période de développement biologique (Steinaker et al. 2004;Bricout, 2003 ; Georgopolos et al. 2010 ; Matina et Rogol, 2011).

Le développement biologique constitue le processus de différenciation et de spécialisation des cellules embryonnaires en différents types de cellules tissus et organes : il comporte deux phénomènes biologiques en interaction que sont la maturation et la croissance.

La maturation est l'ensemble des changements que présente une personne humaine tout au long de son enfance et de son adolescence, depuis sa conception jusqu'à l'âge adulte ou elle atteint sa maturité. Ces changements peuvent intervenir à des moments différents ou à des vitesses différentes. Ces modifications sont des réponses individuelles notamment fonction du sexe du sujet. Ce phénomène varie également selon le système impliqué.

La croissance est le phénomène lié à l'augmentation des dimensions corporelles, l'enfant devient plus grand, plus lourd et augmente ainsi sa masse grasse et sa masse musculaire : et ce via trois mécanismes : l'hypertrophie (augmentation de la taille des cellules), l'hyperplasie (augmentation du nombre de cellules) et l'accrétion (accumulation de substances intercellulaires).

III.2. Adolescence et pratique sportive

Si l'on a longtemps considéré que les adaptations étaient semblables chez les enfants et chez les adultes, les recherches scientifiques récentes ont permis de mettre en lumière les similarités et différences existantes chez ces populations. L'adolescence est en effet une période critique caractérisée par de nombreux bouleversements anatomiques, physiologiques et psychologiques qui font des jeunes des sujets à haut risque.

La période pubertaire est particulièrement propice au développement de la taille, de la masse corporelle ainsi que du tissu osseux en réponse à l'exercice. C'est également la période où les adolescents accentuent leur masse musculaire du fait de l'hypertrophie des fibres musculaires générée par la sécrétion de l'hormone de croissance et de la testostérone notamment.

III.3. Maturation pubertaire et Football

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'impact de la maturation pubertaire sur la pratique du football. On observe alors que la maturation joue un rôle dans les processus de détection, sur les capacités physiques tout comme sur les habiletés spécifiques au football.

III.4. Maturation pubertaire et processus de détection

Lors de la sélection de joueurs ou de la détection de jeunes talents, les batteries de tests physiques font partie intégrante des critères de sélection. Cependant, les catégories de jeu et les âges de sélection sont organisés en fonction de l'âge civil des jeunes footballeurs et non de leurs âges biologiques. Etant donné que le degré de maturation et les modifications inhérentes à la puberté influencent très fortement la performance sportive et que, pour un même âge donné, des jeunes peuvent présenter des différences de développement pubertaire marquées, il peut être difficile de dissocier les effets respectifs de la maturation et des qualités physiologiques sur la performance mesurée à un instant donnée (Buchheit et al. 2008).

Malina et al. (2000) indiquent, dans une étude sur 135 joueurs portugais élites âgés de 11 à 16 ans, qu'à 13 ans, il y a autant de joueurs en « avance » ou en « retard » (différence entre âge biologique et âge chronologique) en termes de maturation alors qu'il n'y en a plus que 12% de joueurs en retard à 15-16 ans. L'on constate donc que le retard de maturation est un facteur excluant l'accès au haut niveau pour des joueurs de 15-16ans. Même, la classification des joueurs en fonction de leur niveau de jeu à savoir élite ou non élite, serait fortement influencée par la taille et le degré de maturation du joueur (Malina et al. 2003) puisque les joueurs à maturité précoce sont les plus performants (Malina et al. 2004)

En football, ces données sont d'un intérêt fondamental. En effet, c'est autour du pic pubertaire qu'ont lieu les processus de détection et sélection de futures élites. En effet, il semble que la maturation pubertaire influence la probabilité d'une carrière chez les professionnels parmi les sujets de l'INF Clairefontaine (Le Gall et al. 2010).

III.5. Maturation pubertaire, anthropométrie, capacités physiques et habiletés techniques

Les joueurs à maturité précoce sont plus rapides, puissants et endurants (Malina et al. 2004). Cela peut s'expliquer par le fait que le pic de croissance en taille ($13,8 \pm 0,8$ ans) est concomitant avec le pic de développement de l'explosivité, de l'endurance musculaire, de la

vitesse, l'agilité, de l'endurance cardiorespiratoire ainsi que de la capacité anaérobie (Philippaerts et al. 2006). Les différences de maturation se reflètent donc au niveau des qualités de vitesse, d'explosivité, de raideur musculaire et de répétitions de sprint mais pas, semble-t-il, au niveau de la performance aérobie chez de jeunes footballeurs moins de 15. Les qualités de vitesse et d'explosivité sont fortement liées à la force musculaire, elle-même assujettie à la croissance musculaire qui n'est possible qu'en présence d'hormones spécifiques (testostérone, hormones de croissance) produites essentiellement à partir de la puberté (Buchheit et al. 2008).

La maturation pubertaire est un des facteurs qui influencent la performance lors de différentes tâches motrices spécifiques au football, à savoir un slalom en course navette avec le ballon, la jonglerie libre ou de la tête ainsi que la précision de la frappe de balle (Malina et al. 2005).

Résumé

La pratique sportive a des effets positifs sur la santé des enfants et des adolescents, mais pratiquée en excès, peut être délétère pour la santé, surtout que l'adolescence est une période critique caractérisée par de nombreux bouleversements sur tous les plans. Au cours de cette période, de nombreux auteurs se sont intéressés à l'impact de la maturation pubertaire sur la pratique sportive en générale et sur le football en particulier. Buchheit et al. (2008) ont mentionné que le degré de maturation pubertaire influence très fortement la performance, puisque les joueurs à maturité précoce sont les plus performants sur tous les plans (Bouchard et al. 2004; Philippaerts et al. 2006; Buchheit et al. 2008). Ainsi, une classification des jeunes footballeurs en élite ou non élite est influencée par et le degré de maturation du joueur (Malina et al. 2003, 2005). En effet, il semble que la maturation pubertaire influence la probabilité d'une carrière chez les professionnels (Le Gall et al. 2010).

IV. REPONSES ET ADAPTATIONS HORMONALES A L'EXERCICE ET A L'ENTRAINEMENT

Le corps humain est un système complexe d'organes en relation les uns avec les autres, qui doivent travailler ensemble pour fonctionner correctement. Les glandes endocrines contrôlent les fonctions de l'organisme par l'intermédiaire de substances chimiques appelées hormones, qui sont libérées dans la circulation générale. Les hormones agissent comme des messagers chimiques qui voyagent dans tout le corps grâce à la circulation sanguine.

L'exercice physique représente une contrainte pour l'organisme et nécessite des adaptations de mécanismes régulateurs lui permettant de rester dans ces limites. En relation avec le système nerveux et le système circulatoire, le système endocrinien coordonne l'action des cellules et des organes. Il joue un rôle important dans la mobilisation et l'utilisation des substrats énergétiques afin d'assurer la régulation du métabolisme énergétique (Bouassida et al. 2003, Bouhlel et al. 2008, Elloumi et al. 2008). Par conséquent, il semble important de s'intéresser aux mécanismes du système endocrinien et de montrer son adaptation à l'exercice et à l'entraînement.

Dans cette partie nous allons nous intéresser à l'étude du comportement des trois axes endocriniens, corticotrope, gonadotrope, et somatotrope en réponse à l'exercice musculaire. Dans un premier temps, nous ferons un rappel sur les origines et les fonctions de ces hormones et sur les caractéristiques qui peuvent influencer leurs concentrations au cours de l'exercice musculaire. Ces caractéristiques sont, la durée, l'intensité, le type d'exercice, et la période de récupération après des sessions d'entraînements intenses. D'autres facteurs interviennent aussi tels que les conditions climatiques et environnementales.

IV.1. Axe corticotrope

IV.1.1. Le cortisol

Le cortisol est la principale hormone glucocorticoïde chez l'être humain. Elle est sécrétée par les cellules de la zone fasciculée du cortex surrénalien. La sécrétion du cortisol est contrôlée par l'ACTH (Adrenocorticotrophic Hormone) ou corticostimuline sécrétée par l'adénohypophyse, elle-même régulée par la CRH (Corticotrophin Releasing Hormone) sécrétée par l'hypothalamus. Sa sécrétion est caractérisée par un rythme circadien très marqué : les valeurs les plus hautes étant relevées le matin au réveil et les plus basses sont enregistrées en fin de soirée et en début de nuit (Fiet et al. 1981 ; Riad-Fahmy et al. 1982 ; Vinning et al. 1983 ; Kirschbaum et Hellhammer, 1989; Lac et Chamoux, 2000). Ces considérations peuvent avoir des répercussions méthodologiques. En effet, il est fondamental que toutes les épreuves répétées (exemple avant et après une période d'entraînement) d'un même protocole soient réalisées au même moment de la journée.

Au repos, le cortisol a une demi-vie, comprise entre 75 et 120 minutes, en réponse à l'exercice physique elle s'abaisse jusqu'à 45 minutes (Lac et al. 1999).

Dans le sang, le cortisol est lié (environ 90%) à des protéines de transport :

- ✓ la CBG (Corticosteroid Binding Globulin) ou transcortine, dont la molécule comporte des récepteurs à haute affinité, et qui lie 70 à 80% du cortisol total,
- ✓ l'albumine, protéine de faible affinité mais de forte capacité, qui lie 10 à 15% du cortisol.

Seule la forme plasmatique libre est biologiquement active. Ainsi 5 à 10% du cortisol total à une action sur les tissus cibles, conduisant à un large spectre d'effets physiologiques.

IV.1.1.1. Effet de l'intensité de l'exercice

L'intensité de l'exercice musculaire représente un déterminant principal de l'importance de la réponse de la cortisolémie. L'augmentation de la concentration plasmatique d'ACTH et du cortisol est liée de façon linéaire au pourcentage de VO₂max atteint lors de l'exercice (Luger et al. 1987). Lors d'un exercice de faible intensité, l'augmentation de la cortisolémie est si faible que sa variation nyctémérale peut suffire à la masquer (Brandenberger et al. 1982 ; Brandenberg, 1985 ; Thuma et al. 1995). En effet, certains auteurs notent une absence d'augmentation des taux du cortisol plasmatique (O'Connor et Corrigan 1987 ; Petraglia et al 1988 ; Schwarz et Kinderman, 1990 ; Viru 1992 ; Moreira et al. 2009), voire une baisse (Cornil et al. 1965 ; Few, 1974 ; Viru 1992), lors des exercices d'intensité inférieure à 60% de VO₂max.

Au regard de cette disparité de résultats, il y a vraisemblablement d'autres facteurs à prendre en considération. D'une part, la composante psychologique du sujet (émotivité, anxiété, anticipation), ainsi que le contexte de l'épreuve peuvent être à l'origine d'une réponse positive du cortisol (Moreira et al. 2009). D'ailleurs, le taux de cortisol peut être considéré comme marqueur simple, précoce et sensible de l'anxiété produite par un exercice musculaire (Mason et al. 1973 ; Bergeron et al. 1991 ; Viru 1992) ou autre événement (Allen et al. 1985 ; Bolm-Audroff et al. 1986). D'autre part, à cette composante psychologique s'ajoute la composante physiologique dans laquelle le cortisol réagit avec l'augmentation locale des catécholamines et l'accumulation de lactate (Viru, 1992 ; Stupnicki et al. 1995). Ce n'est qu'à une intensité dépassant 60% de VO₂max que la cortisolémie augmente, et cela d'autant plus que la puissance est élevée (Hartley et al. 1972 ; Kindermann et al. 1982 ; Cumming et

al. 1986 ; Luger et al.1987 ; Port, 1991 ; Viru et al. 1992 ; Lac et al. 1997 ; Bouassida et al. 2003, Thorpe et al. 2012,). Les auteurs s'accordent pour estimer que la concentration du cortisol augmente d'autant plus que la puissance est proche de la PMA (Hartley et al. 1972 ; Cumming et al. 1986 ; Port, 1991 ; Da Silva et al. 2010) ou supra-maximale (Vanhelder et al. 1985 ; Jürimäe et al. 1990 ; Häkkinen et Pakarinen, 1993). Cette divergence des résultats peut être expliquée, au moins en partie, par le degré et le niveau d'entraînement des sujets. En effet, plusieurs auteurs ont mentionné que la réponse du cortisol à l'exercice physique est plus importante chez les sujets dont le niveau de pratique est le plus élevé (Raczynska et al. 1980 ; Leite et al. 2011). De plus, l'intensité relative de l'exercice semble modifier l'amplitude de la variation du cortisol. Pour Luger et al. (1987), à même intensité relative (exprimée en pourcentage de VO_{2max}), la réponse d'ACTH et du cortisol plasmatique à l'exercice est identique entre sujets entraînés et non entraînés.

IV.1.1.2. Effet de la durée de l'exercice

La durée de l'exercice influence aussi la cortisolémie. Lors d'un exercice d'intensité modérée (60% de VO_{2max}), l'activation corticotrope ne s'observe qu'à partir d'une heure alors que 10 minutes d'exercice à 90% de VO_{2max} suffisent à augmenter significativement la sécrétion du cortisol (Luger et al. 1987). Selon Lac et al. (1999) une durée d'un ¼ heure est nécessaire pour observer une augmentation significative du cortisol. Différentes études (DeLignières et al. 1976 ; Urhausen et kindermann, 1987 ; Fellmann et al. 1989 ; Lutoslawaska et al. 1991 ; Port 1991 ; Scavo et al. 1991 ; Snegovskaya et Viru, 1993a et b ; Lac et al. 1997 ; Lac et Berthon, 2000) ont montré une augmentation des taux du cortisol plasmatique ou salivaire pour des exercices physiques soutenus et qui se prolongent dans le temps. Ces taux peuvent atteindre jusqu'à 3 à 4 fois sa valeur de repos (Urhausen et Kinderman, 1987 ; Urhausen et al. 1987 ; Fellmann et al. 1989 ; Lutoslawaska et al. 1991 ; Snegovskaya et Viru, 1993a et b, Da Silva et al. 2010, Thorpe et al. 2012). La réponse du cortisol à ce type d'effort est selon certains auteurs proportionnelle à la durée de celui-ci (Lutoslawaska et al. 1991 ; Scavo et al. 1991).

A la lumière de la divergence des résultats concernant les variations du cortisol lors des exercices physiques de différentes caractéristiques (bref, long, intense ou modéré) il ressort que celle-ci dépend du degré d'entraînement des sujets. Ainsi, il est communément admis que l'entraînement physique régulier peut avoir des conséquences psychologiques positives, en particulier une adaptation physiologique de l'organisme au stress (Feltz et

Ewing, 1987 ; Petruzzello et Tate, 1997 ; Moreira et al. 2009). Une intensité plus importante de l'exercice physique semble nécessaire pour activer le système adrénocortical.

IV.1.1.3. Effet de l'entraînement

Pour ce qui est de l'adaptation à long terme, l'entraînement peut agir sur les fonctions endocrines de deux façons. La première est la modification de la réponse hormonale à l'exercice, la seconde réside dans les changements du profil hormonal au repos ou bien les deux à la fois. En effet, après une période d'entraînement, les réponses hormonales prononcées n'apparaîtront que lors des exercices plus intenses. Pour des exercices épuisants, réalisés après une période d'entraînement, à une intensité supérieure à celle d'avant entraînement, les réponses hormonales sont plus importantes (Kraemer et al. 1995 ; Bonifazi et al. 2001 ; Wahl et al. 2010 ; Leite et al. 2011).

D'autres part, plusieurs auteurs rapportent une baisse significative des concentrations du cortisol de repos après une période d'entraînement (Kirwan et al. 1990 ; Tabata et al. 1990 ; Staron et al. 1994). Il semble que cette diminution soit la conséquence d'une libération réduite d'ACTH au stress que représente l'entraînement. Les surrénales seraient moins sensibles à la stimulation de l'ACTH (Hickson et al. 1993). Par contre, d'autres auteurs ont montré que lors des périodes d'entraînement intensif la cortisolémie basale est plus élevée qu'avant cette période (Passelergue et Lac, 1998 ; Bonifazi et al. 2000 ; Filaire et al. 2001).

Cette adaptation peut résulter de la baisse de sensibilité hypophysaire au rétrocontrôle négatif du cortisol. Cela pourrait expliquer la réponse différente des sujets entraînés, principalement en endurance et les sédentaires lorsque leur axe corticotrope est soumis à un challenge physiologique (exercice musculaire) ou pharmacologique (Heuser et al. 1991 ; Duclos et al. 1998 ; Duclos, 2001). Les sujets entraînés peuvent échapper à ce rétrocontrôle négatif pour répondre à une stimulation ultérieure (Duclos et al. 1996) et au freinage physiologique de l'axe corticotrope (Heuser et al. 1991).

De nombreuses études mentionnent que l'amélioration des performances chez les sportifs, serait associée à une augmentation significative des concentrations du cortisol au repos (Snegovskaya et Viru, 1993a et b ; Hoogeveen et Zanderland, 1996 ; Bonifazi et al. 2001 ; Filaire et al. 2001a), par contre d'autres la contredisent (Bosco et al. 1996 ; Bonifazi et al. 2000). Toutefois, plusieurs investigateurs ne rapportent pas de modification des valeurs du cortisol de repos (Flynn et al. 1994 ; Mujika et al. 1996 ; Filaire et al. 1998, 2001a). Il semble

que les taux de cortisol au repos augmentent lorsque l'entraînement est particulièrement intense (Steinacker et al. 1993 ; Passelergue et Lac, 1998 ; Bonifazi et al. 2000 ; Filiatre et al. 2001a, Wahl et al 2010, Thorpe et al. 2012).

Résumé :

Le Cortisol est la principale hormone glucocorticoïde chez l'être humaine. Sa sécrétion caractérisée par un rythme circadien est contrôlée par l'ACTH. Au repos, le cortisol a une demi-vie, comprise entre 75 et 120 minutes, en réponse à l'exercice physique elle s'abaisse jusqu'à 45 minutes (Lac et al. 1999). L'intensité de l'exercice l'affecte et ce n'est qu'à une intensité dépassant 60% de VO₂max que la cortisolémie augmente, et cela d'autant plus que la puissance est élevée (Bouassida et al. 2003, Thorpe et al. 2012). La réponse du cortisol à l'exercice physique est plus importante chez les sujets dont le niveau de pratique est le plus élevé (Raczynska et al. 1980 ; Leite et al. 2011). La durée de l'exercice influence aussi, la cortisolémie. Des exercices de courtes durées et très intenses augmentent le taux de cortisol (Luger et al. 1987). Une augmentation des taux de cortisol plasmatique est observée aussi suite à des exercices physiques soutenus et qui se prolongent dans le temps (Urhausen et al. 1987, Scavo et al. 1991, A.S.R. da Silva et al 2010, Thorpe et al. 2012). Quant à l'effet de l'entraînement, il peut agir sur les fonctions endocrines de deux façons. La première est la modification de la réponse hormonale à l'exercice, la seconde réside dans les changements du profil hormonal au repos ou bien les deux à la fois (Kraemer et al. 1995 ; Bonifazi et al. 2001 ; Wahl et al. 2010 ; Leite et al. 2011).

IV.2. Axe gonadotrope

IV.2.1. La Testostérone

La testostérone, est la principale hormone androgène anabolisante à production endogène chez l'homme. Chez un homme jeune en bonne santé, les testicules produisent pratiquement 95% des hormones androgènes, la plus grande partie étant représentée par la testostérone, au rythme de pratiquement 10mg par jour. Environ 98% de la testostérone circulante sont attachés à une protéine dans la circulation sanguine (ce qui la rend techniquement indisponible) tandis que les 2% restant (appelés testostérone libre) servent à presque toutes les activités physiologiques de l'homme (Mowszowicz, 1984). Prés de la moitié de la testostérone attachée à des protéines est solidement liée à la sex-hormone-binding-globulin (SHBG) alors que l'autre moitié reste légèrement liée à des protéines comme

l'albumine. Le terme biodisponible fait référence à la testostérone libre et à celle légèrement liée à des protéines. Au niveau du tissu testiculaire, ce sont les cellules de Leydig qui produisent la testostérone sous stimulation pulsatile d'une hormone hypophysaire, la Lutétropine (LH). La LH est également sous l'influence de la LH-RH (Luteinizing Hormone Releasing Hormone) hypothalamique (Sannikka et al. 1983). La sécrétion de la testostérone est caractérisée par un rythme circadien; les valeurs les plus hautes sont observées le matin et les plus basses le soir (Riad-Fahmy et al. 1982 ; Nicolau et al. 1985). Ce rythme existe dès le stade pubertaire et s'affirme au cours de la croissance. Il demeure néanmoins modéré avec une amplitude de 30%. D'un point de vue méthodologique, l'existence de ce rythme est à prendre en considération dans les protocoles où on est amené à mesurer les taux de testostérone. La testostérone est présente dans la salive, où son taux reflète la fraction libre plasmatique (Lac et al. 1993 ; Obminski et Stupnicki, 1997). De plus, au niveau psychologique, la testostérone renforce les caractères de dominance, de combativité et d'agressivité chez l'homme et l'animal (Dufty, 1989 ; Bahrke et al. 1990), une propriété qui revêt une importance particulière dans certaines pratiques sportives.

IV.2.1.1. Réponse de la testostérone à l'exercice

Il est communément admis que l'exercice physique provoque des variations de la testostéronémie. Les études relatives à la réponse endocrinienne sous l'effet d'un exercice physique s'accordent pour confirmer une augmentation de la testostérone (Jurimae et al. 1990 ; Jensen et al. 1991 ; Hakkinen et Pakarinen, 1993, 1995 ; Kraemer et al. 1992, 1995 et 1998). Il apparaît que l'intensité, la durée et le type de l'activité physique sont des facteurs importants dans la réponse de la testostérone à l'exercice (Kraemer et al. 1992). Lors des exercices intenses et de courtes durées plusieurs auteurs observent des augmentations significatives (Cumming et al. 1987 ; Schwab et al. 1993 ; Kraemer et al. 1995, 1998 ; Eliakim et al. 2009 ; Leite et al. 2011). Cette augmentation n'est pas liée à une sécrétion augmentée mais à une réduction de la clairance métabolique et hépatique de la testostérone, elle-même étant liée à une diminution du débit sanguin pendant l'exercice au profit des tissus directement impliqués par l'exercice (Sutton et al. 1973 ; Cadoux-Hudson et al. 1985).

Pour un exercice de durée moyenne (30 min à 2h) (d'intensité modérée à forte), on observe une augmentation de la concentration plasmatique de testostérone (objectivable dès la trentième minute d'exercice, puis maintien en plateau de la testostéronémie). Cette augmentation n'est pas liée à une sécrétion augmentée mais à une réduction de la clairance

métabolique et hépatique de la testostérone liée à l'exercice. La réduction du métabolisme splanchnique de la testostérone est liée à une diminution du débit sanguin pendant l'exercice, au profit des tissus directement impliqués par l'exercice (cœur, muscles squelettiques...) (Duclos, 2001).

Inversement, quand l'exercice se prolonge, généralement au-delà de deux à trois heures, voire après six heures, après une augmentation transitoire de la testostéronémie, par la suite une diminution de la concentration plasmatique de testostérone se déclenche et une hypotestostérone s'installe (Lutoslawska et al. 1991 ; Viru et al. 1992 ; Duclos et al. 1996 ; Gastmann et al. 1998 ; Lac et Berthon, 2000 ; Da Silva et al. 2010). Parfois le retour à la testostéronémie initiale, préexercice, peut être retardé de plusieurs heures après arrêt de l'exercice. Cette suppression transitoire de la production de testostérone serait plus faible voire parfois absente chez le sujet entraîné en endurance, suggérant des adaptations à long terme de l'axe gonadotrope avec l'entraînement physique continu (Vasankari et al. 1993).

Cette baisse de la testostéronémie a une double origine : centrale par la diminution de la sécrétion hypothalamique de GnRH, tandis que la capacité hypophysaire à produire et à sécréter des gonadotrophines reste normale (Cumming et al. 1983 ; Barbarino et al. 1998 ; Kujala et al. 1990), et périphérique, testiculaire, par la diminution du nombre de récepteurs à la LH (Johnson et Evitt, 1984). Ce dernier mécanisme expliquerait les résultats constatés par plusieurs auteurs (Bambino et Hsueh, 1981 ; Cumming et al. 1986) selon lesquels la capacité maximale de la stéroïdogenèse testiculaire est altérée pendant les premières heures de récupération suivant un exercice musculaire.

Le rôle physiologique de cette diminution de la testostéronémie représente un phénomène adaptatif. Il s'avère qu'elle permettrait de dévier l'utilisation des acides aminés de la voie de synthèse protéiques vers la voie de néoglucogenèse afin de recharger en glycogène les réserves déplétées de l'organisme (Guezennec et al. 1982). Toutefois, il est important de noter que les variations pour cette hormone sont d'une amplitude modérée en comparaison à celles observées pour le cortisol. La signification physiologique de ces faibles variations des taux de testostérone, en réponse à l'exercice, est difficile à établir. D'autant plus que les valeurs post-exercice reviennent, moins de six heures après l'exercice, à la normale. Les valeurs relevées post-exercice contribueraient à reconstituer les réserves glycogéniques hépatiques ainsi que les protéines musculaires, et faciliteraient donc la récupération (Lacour, 1983 ; Dehennin, 1995).

IV.2.1.2. Réponse de la testostérone à l'entraînement

Les données de la littérature à ce sujet divergent selon les auteurs. Plusieurs études ont montré que lors de périodes d'entraînement intensif, les valeurs de repos de testostérone sont plus basses qu'avant la période d'entraînement (Costill et al. 1991 ; Vervoorn et al. 1991 ; Steinacker et al. 1993 ; De Sousa et al. 1994 ; Flynn et al. 1994 ; Hoogeveen et Zonderland, 1996 ; Calbet et al. 1999 ; Filaire et al. 2001).

Récemment, Da Silva et al. (2010) ont montré qu'après un programme d'entraînement de 12 semaines de football les valeurs de testostérone et le rapport Testostérone/Cortisol étaient significativement moins élevés que les valeurs basales. D'après l'ensemble de ces résultats, la fatigue résultant des différentes sessions d'entraînement intense ou de la saison footballistique complète, se traduit par une baisse plus ou moins importante des taux de testostérone au repos. Le volume et la charge d'entraînement sont à l'origine de cette altération des valeurs de testostérone. D'autres investigations ne notent pas de changement des taux de testostérone de repos (Guezennec et al. 1986 ; Hakkinen et al. 1987 ; Alen et al. 1988 ; Seidman et al. 1990 ; Nicklas et al. 1995 ; Mackinnon et al. 1997). Inversement, une période d'entraînement de longue durée peut augmenter les taux de testostérone totale et libre au repos, ainsi que lors d'exercice musculaire (Hakkinen et Pakarinen, 1993, 1995 ; Staron et al. 1994 ; Kraemer et al. 1999). Cette augmentation est associée à un gain de la force musculaire, et reflète une adaptation de l'axe gonadotrope à l'intensification du travail musculaire, créant ainsi des conditions optimales au développement de la force musculaire (Hakkinen et Pakarinen, 1993). De plus l'entraînement de force a un effet positif sur la modulation du rapport Testostérone/Cortisol chez les jeunes entraînés (Leite et al. 2011). Certains auteurs ont observé aussi, que les testostéronémies élevées sont corrélées positivement avec de forces chez des joueurs de football (Bosco et al. 1996 ; Bonifazi et al. 2001).

Hansen et al. (1999) ont démontré, chez des jeunes footballeurs que le développement de la force isométrique et la performance en saut en longueur était lié à des changements des concentrations sériques de testostérone, mais aussi influencé par la taille du corps, ce qui indique que la testostérone joue un rôle important dans le développement de la force chez les jeunes garçons.

Dans ce cadre, il est indispensable de distinguer l'entraînement orienté vers la vitesse et la force et celui orienté vers l'endurance. Dans cette perspective, Lac et al. (1995) ont mentionné que les baisses les plus importantes sont observées dans le second cas. La nature de l'activité sportive : force ou endurance semble donc jouer un rôle majeur dans les variations des taux de testostérone.

Résumé

La Testostérone, est le principal androgène anabolisant à production endogène chez l'homme. Prés de la moitié de la testostérone est attachée à la SHBG alors que l'autre moitié reste légèrement liée à des protéines comme l'albumine, tandis que les 2% restant (appelés testostérone libre) servent à presque toutes les activités physiologiques de l'homme (Mowszowicz, 1984). L'intensité, la durée et le type de l'activité physique sont des facteurs importants modulant la réponse de la testostérone à l'exercice (Kraemer et al. 1992). Des exercices intenses et de courtes durées augmentent la testostéronomie (Kraemer et al. 1995, 1998 ; Eliakim et al. 2009). Alors que des exercices prolongés de type endurance, généralement au-delà de deux à trois heures, entraînent une hypotestostéronémie (Lutoslawska et al. 1991 ; Gastmann et al. 1998 ; Lac et Berthon, 2000 ; Da Silva et al. 2010). Quant à la réponse à l'entraînement, Les données de la littérature à ce sujet divergent selon les auteurs. Calbet et al. (1999), Filaire et al. (2001) et Da Silva et al. (2010) montrent une diminution de taux; Nicklas et al. (1995) et Mackinnon et al. (1997) montrent une stagnation et (Hakkinen et Pakarinen 1993, 1995 ; Kraemer et al. 1999) montrent une augmentation du taux de testostérone totale et libre au repos.

IV.3. Axe somatotrope

La fonction somatotrope est sous la dépendance de l'hormone de croissance (Growth Hormone ou GH). Certains effets de cet axe sont directement liés à l'action périphérique de la GH et d'autres s'exercent par l'intermédiaire d'hormones relais appelées somatomédines (Insulin-like Growth Factors ou IGF). Les IGFs, en particulier L'IGF-I, sont indispensables pour certaines actions de la GH (Kraemer, 1981 ; Kelly et al. 1991). Ce système GH/IGF-I est complexe et finement régulé par les protéines porteuses des somatomédines (Insulin-like Growth Factor Binding Proteins ou IGFBPs), dont la principale impliquée dans l'effort physique est l'IGFBP-3 (Rosenfeld et al. 1994 ; Manetta et al. 2003). L'exercice physique est un stimulus puissant du système GH/IGF-I. Le rôle de ce système lors de l'exercice physique

n'est toutefois pas clairement établi et plusieurs points restent à éclaircir. Dans cette partie nous nous limiterons à l'étude de la GH, l'IGF-I et de sa principale protéine de transport l'IGFBP-3.

IV.3.1. Hormone de croissance (GH)

L'hormone de croissance (Growth Hormone ou GH) est de nature protéique, sécrétée par l'hypophyse antérieure. La sécrétion de GH au cours du nyctémère est de caractère pulsatile, avec 6 à 12 pulses spontanés par jour et des interpulses caractérisés par des valeurs basses de GH (Devesa et al. 1992). Cette sécrétion est contrôlée d'une part par la GHRF (Growth Hormone Releasing Factor) et d'autre part par la GHIH (Growth Hormone Inhibitor hormone) ou somatostatine (Deigne et al. 1988). Ces deux hormones sont sécrétées dans l'hypothalamus, la première est stimulatrice et la deuxième est inhibitrice. De nombreux autres facteurs contrôlent la libération de GH tels que la dopamine, la sérotonine et les catécholamines. L'élévation de l'un de ces différents facteurs sous l'effet de l'exercice est probablement responsable de l'augmentation des concentrations de GH (Brillon et al. 1986 ; Muller, 1987). Les taux sanguins de GH sont en fait une traduction décalée de sa libération. Sa demi-vie est relativement courte, elle est d'environ de 30 minutes (Jorgensen et al. 1989 ; Kelly et al. 1990). Les taux des GHBP sont variables en fonction de l'âge, du sexe, et du statut nutritionnel du sujet et des taux de GH eux-mêmes. L'exercice physique ne semble pas les affecter (Cuneo et Wallace, 1994). La GH est une hormone hétérogène sur le plan biochimique qui circule sous au moins cinq isoformes (Lewis et al. 1994), dont la principale est d'une masse molaire de 22 kDa. Cette forme possède toutes les propriétés physiologiques dites « classiques » de GH. On trouve également une forme glycosylée (27 kDa), et trois formes courtes : 20 kDa, 17 kDa et 5 kDa.

La GH a des effets ubiquitaires concernant la croissance cellulaire de différents tissus, principalement le tissu musculaire et osseux, mais elle joue aussi un rôle important dans la régulation des métabolismes. Elle agit sur les métabolismes glucidiques et lipidiques en faisant libérer le glucose et les acides gras libres dans le sang (Moller et al. 1990).

Au cours de l'exercice la GH induit une lipolyse. La GH est aussi une hormone ergogénique qui améliore la performance musculaire et myocardique. Elle agit également positivement sur la masse musculaire squelettique et raccourcit la période de récupération (Jorgensen et al. 1989 ; Cueno et al. 1991; Deyssig et al. 1993). Elle assure aussi la

préparation métabolique de l'organisme en vue d'un exercice ultérieur (Galbo, 1983 ; Guezennec et al. 1991 ; Felsing et al. 1992). Enfin, la GH induit des changements dans la composition corporelle, ainsi un apport exogène en GH provoque une augmentation de la masse maigre et une diminution de la masse grasse (Crist et al. 1988 ; Salomon et al. 1989 ; Felipe et al. 1998).

IV.3.1.1. Variation de GH à l'exercice

Il est communément admis que l'exercice musculaire représente le stimulus physiologique le plus puissant de la sécrétion de GH (Sutton et Lazarus, 1976 ; Viru, 1992). Les études de la réponse endocrinienne sous l'effet d'un exercice convergent toutes pour mettre en évidence une augmentation de GH (Gordon et al. 1994 ; Kraemer et al. 1995 ; Pritzlaff et al. 1999, 2000, 2002 ; Bouassida et al. 2003 ; Ehrnborg et al. 2003 ; Mejri et al. 2004). Celle-ci présente des variations dont l'amplitude dépend de multiples facteurs : l'intensité relative, la durée, la masse musculaire sollicitée pendant l'exercice et le niveau d'entraînement du sujet (Luger et al. 1992 ; Viru et al. 1992 ; Cuneo et Wallace, 1994 ; Stokes, 2003).

IV.3.1.1.1. Effet de l'intensité de l'exercice

La réponse de GH varie selon l'effort physique (Felsing et al. 1992 ; Cuneo et Wallace, 1994). L'exercice doit être supérieur à un certain seuil d'intensité pour déterminer une réponse (Kjaer et al. 1988 ; Felsing et al. 1992 ; Hartman et al. 1993 ; Snegovskaya et viru, 1993). Selon Felsing et al. (1992) et Weltman et al. (1997), une intensité supérieure ou égale au seuil lactique 2 est requise pour une activation de la GH. Cuneo et Wallace (1994), à partir d'une synthèse de 25 études, ont conclu que le seuil de réponse se situe vers 40% de VO₂max. Pour certains, cette réponse atteindrait un certain niveau vers 70-80% de VO₂max (Hartley et al. 1972 ; Sutton et Lazarus, 1976 ; Farrell et al. 1983 ; Luger et al. 1992), et pour d'autres l'effet stimulant s'accroîtrait jusqu'à 100% de VO₂max (Naveri, 1985). Pour un même pourcentage de VO₂max la réponse de GH est plus ample lors d'exercice réalisé avec les membres supérieurs par rapport aux membres inférieurs (Kozlowski et al. 1983 Vanhelder et al. 1986). D'autre part, il existe une relation linéaire entre l'augmentation de la sécrétion de GH et l'intensité de l'exercice (Pritzlaff et al. 1999, 2000 ; Maas et al. et Weltman et al. 2000). Ceci traduit une augmentation des pulses sécrétoires hypophysaires (Felsing et al. 1992 ; Thompson et al. 1993 ; Kanaley et al. 1997).

Le mécanisme neuroendocrine causal de GH lors de l'exercice reste encore mal élucidé (Guistina et Veldhuis, 1998), mais il serait plus lié à une baisse de la somatostatine qu'à une augmentation de GHRH. Cette inhibition du tonus hypothalamique somatostatinergique est due à l'activation du système cholinergique central (Bruni et Meites, 1978 ; Delitala et al. 1982 ; Casanueva et al. 1984, 1986). En effet, la réponse de GH à l'exercice est inhibée par la somatostatine et /ou son analogue l'octréotide (Chalmers et al. 1979 ; Vasankari et al. 1995).

IV.3.1.1.2. Effet de la durée de l'exercice

La durée de l'exercice influence aussi l'amplitude de la réponse sécrétoire en GH. A la suite d'exercices intenses et de courtes durées une augmentation de concentration de GH est généralement observée (Nevill et al. 1996 ; Zaccaria et al. 1999 ; Viru et al. 1992 ; Stokes et al. 2002, Meckeï et al. 2009 ; Hosick et al. 2012). Cependant, au cours d'exercices durant moins de 5 minutes à intensité modérée (50% de VO₂max), Felsing et al. (1992) ne rapportent pas de modification de la concentration de GH. L'augmentation de GH est généralement obtenue lors d'exercices de longue durée (Galbo, 1983 ; Scavo et al. 1991 ; Viru et al. 1992, 2001 ; Vasankari et al. 1993 ; Kanaley et al. 1997). Un exercice très prolongé comme le marathon s'accompagne d'un épuisement de la réponse de GH alors même que celle-ci persisterait après des tests pharmacologiques comme le test d'hypoglycémie en réponse à une charge d'insuline (Cuneo et Wallace, 1994).

Le pic sécrétoire de la GH culmine au cours des 15 premières minutes de l'exercice lorsque celui-ci dure entre 15 et 45 minutes (Lassarre et al. 1974 ; Raynaud et al. 1983), ou bien à la suite d'exercices brefs (Parkin, 1986 ; Ehrnborg et al. 2003). Des concentrations élevées de GH peuvent se maintenir jusqu'à la 30^{ème} minute de récupération post-exercice (Rogol et al. 1992).

De nombreux facteurs ont été impliqués dans le déterminisme de la réponse de GH à l'exercice, tels que l'hypoglycémie, l'augmentation des concentrations plasmatiques des catécholamines, de β -endorphines ainsi que la glycolyse anaérobie. Pour certains auteurs (Kindermann et al. 1982 ; Vanhelder et al. 1985 ; Gordon et al. 1994), un déterminant essentiel de cette réponse de GH serait l'anaérobiose et l'hyperlactatémie. Les réponses somatotropes les plus marquées sont observées lors d'exercice s'accompagnant de forte lactatémie (Kraemer et al. 1991 ; Chwalbiska-Moneta et al. 1996 ; Langfort et al.

2001). D'autres facteurs peuvent jouer un rôle secondaire sur la sécrétion de GH induite par l'exercice tels que l'augmentation de la température corporelle et la déshydratation (Christensen et al. 1984 ; Peyreigne et al. 2001). La production de la GH dépend également de l'âge, du sexe, et de la composition corporelle de l'individu. A l'état basal, la sécrétion de GH est plus importante chez les femmes que chez les hommes (Vanderberg et al. 1996 ; Guistina et Veldhuis, 1998 ; Wideman et al. 1999). Cette différence est expliquée par la quantité de GH sécrétée par pulse, qui est supérieure chez la femme, en relation avec la production d'œstrogènes (Veldhuis et al. 1995 ; Vanderberg et al. 1996). Néanmoins, la réponse de GH (en valeur absolue) à l'exercice est identique pour les deux sexes (Wideman et al. 1999 ; Davis et al. 2001). D'autre part, les travaux de Widman et al. (1999), de Pritzlaff et al. (2002) et de Ehrnborg et al. (2003) ont rapporté que pendant l'exercice, le pic sécrétoire de GH est plus précoce chez la femme que chez l'homme.

La GH provoque un rétrocontrôle négatif sur sa propre production, soit directement au niveau de l'hypophyse (Pontirolli et al. 1991), soit au niveau de l'hypothalamus, par l'intermédiaire d'une augmentation de la somatostatine et/ou par une diminution de GHRH (Lanzi et Tannenbaum, 1992). En effet, des études réalisées chez des adultes et chez des adolescents, ont montré que la répétition d'exercices intenses provoque une diminution progressive de la réponse de GH à l'exercice suivant (Cappon et al. 1994 ; Stokes et al. 2002, 2004 ; Mejri et al. 2005). Cependant, Kanaley et al. (1997) ne trouvent pas de diminution de la réponse de GH lors de la répétition d'exercice de type aérobie.

IV.3.1.1.3. Effet du type d'exercice

Les exercices dynamiques à prédominance aérobie rapportent des augmentations de la valeur de GH (Felsing et al. 1992 ; Thompson et al. 1993 ; Kanaley et al. 1997). Il a été montré aussi que les sessions d'entraînement de force (musculature et haltérophilie), ont généralement un effet stimulant marqué (Gordon et al. 1994 ; Hakkinen et Pakarinen, 1995 ; Kraemer et al. 1998 ; Hakkinen et al. 1998 ; Nindl et al. 2000 ; Nemet et al. 2010 ; Leite et al. 2011). Les études de Hakkinen et al. (1998) et de Kraemer et al. (1995b) ont montré l'existence de plus importantes augmentations de GH avec des protocoles d'hypertrophie (charge modérée et nombreuses répétitions) qu'avec des protocoles de force maximale (charges élevées et peu de répétitions). La sécrétion de GH est plus importante pour un travail discontinu que pour un travail continu (Cuneo et Wallace, 1994).

IV.3.1.2 Effet de l'entraînement

L'entraînement sportif intensif a des effets positifs sur la sécrétion somatotrope hypophysaire. Weltman et al. (1992) ont rapporté qu'à l'issue d'un an d'entraînement en endurance à une intensité supérieure au seuil lactique 2 l'amplitude ainsi que l'aire sous la courbe des pics de GH de repos ont presque doublé. Dans le même sens, une augmentation de la sécrétion de GH de repos lors d'une période d'entraînement a été rapportée (Ceneo et Wallace, 1994 ; Silverman et Mazzeo, 1996), mais d'autres travaux ne mentionnent pas de variations de concentrations de GH de repos après une période d'entraînement (Nevill et al. 1996 ; Bonifazi et al. 1998 ; McCall et al. 1999 ; Stokes et al. 2004). Il semble que la concentration de GH de repos augmente lorsque l'entraînement est particulièrement intense (Maestu et al. 2003 ; Wahl et al. 2010, Schmikly et al. 2012).

Pour ce qui est de l'effet de l'entraînement sur la production de GH au cours de l'exercice musculaire, les résultats ne sont pas unanimes. Certains auteurs rapportent une augmentation (Cuneo et Wallace, 1994 ; Silverman et Mazzeo, 1996 ; Bonifazi et al. 1998 ; Mejri et al. 2004), d'autres une diminution (Weltman et al. 1997 ; Stokes et al. 2004 ; Mejri et al. 2005), ou encore pas de différence (Luger et al. 1992 ; McCall et al. 1999 ; Zaccaria et al. 1999). Il s'avère que l'augmentation de GH, lors de l'exercice, chez les sportifs entraînés traduit une adaptation endocrinienne à l'activité physique régulière et constitue probablement une anticipation physiologique en vue d'exercices ultérieurs. En d'autres termes, les besoins de l'organisme en substrats énergétiques sont d'autant plus forts que l'exercice peut être de haute intensité, et que le sujet est plus entraîné (Sirek et Sirek, 1990). Une intensité d'exercice plus importante est nécessaire pour provoquer une réponse sécrétoire positive de GH chez des sujets bien entraînés (Brillon et al. 1986). Par contre, le surentraînement du sportif entraîne un dysfonctionnement hypothalamique. L'un des éléments qui le caractérise est le blocage de la sécrétion de GH à des tests de stimulation usuels (choc hypoglycémique par l'insuline) (Barron et al. 1985 ; Legros et al. 1992), ou à des exercices physiques (Lehmann et al. 1993 ; Urhausen et al. 1995). Un entraînement dans des limites tolérables amplifierait la sécrétion somatotrope, une surcharge pathologique aurait un effet inverse, bloquant celle-ci (Theintz et al. 1993 ; Urhausen et al. 1995). Cette hypothèse qui rend ainsi compte des apparentes contradictions rapportées plus haut quant à l'effet de l'entraînement sur la réponse de GH a été parfaitement confirmée ultérieurement par plusieurs autres études (Urhausen et al. 1998 ; Urhausen et Kindermann, 2002 ; Meeusen et al. 2004 ; Nebigh et al. 2009 ; Nemet et al. 2010). En contrepartie, d'autres investigateurs ne rapportent pas d'altération de GH de repos

et en réponse à l'exercice chez des sujets surentraînés en résistance (Fry et Kraemer, 1997 ; Fry et al. 1998).

Pour l'exploration de l'axe somatotrope, l'utilisation des variations d'IGF-1 et de ses protéines porteuses est préférée à celle de la GH seule dont la sécrétion est pulsatile. Néanmoins, on peut affirmer que la concentration de GH augmente en réponse à l'exercice et à l'entraînement mais diminue en cas de surentraînement.

Résumé :

La fonction somatotrope est sous la dépendance de l'homme de croissance (Growth Hormone ou GH). Les études de la réponse endocrinienne sous l'effet d'un exercice convergent toutes pour mettre en évidence une augmentation de GH (Kraemer et al. 1995 ; Bouassida et al. 2003 ; Mejri et al. 2004) qui dépend de multiples facteurs : l'intensité relative, la durée, la masse musculaire sollicitée pendant l'exercice et le niveau d'entraînement du sujet (Cuneo et Wallace, 1994 ; Stokes, 2003). La réponse de GH varie selon l'effort physique (Felsing et al. 1992 ; Cuneo et Wallace, 1994) donc il existe une relation linéaire entre l'augmentation sécrétoire de GH et l'intensité de l'exercice (Pritzlaff et al. 1999, 2000 ; Maas et al. et Weltman et al. 2000). L'exercice doit être supérieur à un certain seuil d'intensité pour déterminer une réponse (Hartman et al. 1993 ; Snegovskaya et Viru, 1993). L'amplitude de la réponse sécrétoire en GH dépend de la durée de l'exercice (Felsing et al. 1992 ; Cuneo et Wallace, 1994 ; Stokes et al. 2002 ; Meckei et al. 2009 ; Hosick et al. 2012). Les exercices dynamiques à prédominance aérobie (Felsing et al. 1992 ; Thompson et al. 1993 ; Kanaley et al. 1997), ainsi que les sessions d'entraînement de force (Kraemer et al. 1998 ; Hakkinen et al. 1998 ; Nindl et al. 2000 ; Nemet et al. 2010 ; Leite et al. 2011) rapportent des augmentations de la valeur de GH. Quant à l'effet de l'entraînement, Les données de la littérature à ce sujet divergent selon les auteurs. Certains auteurs rapportent une augmentation (Bonifazi et al. 1998 ; Mejri et al. 2004), d'autres une diminution (Weltman et al. 1997 ; Stokes et al. 2004 ; Mejri et al. 2005), ou encore pas de différence (Luger et al. 1992 ; McCall et al. 1999 ; Zaccaria et al. 1999).

IV.3.2. Somatomédine-C ou IGF-I

La somatomédine-C ou facteur de croissance (Insuline-like Growth Factor-I ou IGF-I) est un polypeptide sécrété par le foie sous contrôle de la GH. Elle est composée d'une chaîne de 70 acides aminés. Sa structure est semblable à celle de la pro-insuline. Il a été montré que l'IGF-I joue un rôle majeur dans de nombreux processus physiologiques (Stewart et Rotwein 1996). Elle est impliquée en particulier dans l'anabolisme au niveau de tout l'organisme, notamment dans la croissance osseuse et musculaire (Florini, 1987 ; Chevenne, 1991 ; Kelly et al. 1991). Ses taux circulants sont régulés par la GH et l'état nutritionnel (Thissen et al. 1994 ; Smith et al. 1995). Le muscle en cours de régénération ne reçoit pas seulement l'IGF-I véhiculée par voie sanguine, il contient également des concentrations accrues d'ARN messenger codant pour l'IGF-I, suggérant ainsi une action autocrine. C'est l'association synergique de GH et de la contraction musculaire, qui favorise cette production musculaire d'ARN messenger codant pour l'IGF-I.

L'IGF-I représente le relais hépatique de l'action de GH ; sa concentration plasmatique reflète une intégration des changements au niveau de la GH (Blum et al. 1990, 1993). Par mécanisme de rétrocontrôle négatif, l'IGF-I exerce un effet inhibiteur sur la GH (Berelowitz et al. 1981 ; Kraemer, 1988 ; Kelly et al. 1991). Ce facteur de croissance a une production circadienne continue liée à une demi-vie relativement longue d'environ 6 heures (Jorgensen et al. 1989). Ainsi, une seule mesure permet de déterminer la sécrétion journalière de la GH (Roelen et al. 1997). La fraction libre, biologiquement active de l'IGF-I est véhiculée par six protéines porteuses (IGFBP-1 à IGFBP-6). La fraction libre, biologiquement active de l'IGF-I qui représente environ 1% d'IGF-I totale (Baxter, 1994 ; Frystyk et al. 1994 ; Rosenfeld et al. 1994 ; Dall et al. 2001), dépend non seulement de la production de GH, mais également du degré de liaison à ces protéines porteuses en particulier l'IGFBP-3.

IV.3.2.1. Effet de l'exercice

L'influence de l'exercice musculaire sur la réponse d'IGF-I plasmatique diverge selon les auteurs. Certains auteurs montrent que l'exercice physique s'accompagne d'une élévation de la concentration plasmatique d'IGF-I (Hagberg et al. 1988 ; Roelen et al. 1997 ; Chicharro et al. 2001 ; Dall et al. 2001 ; Manetta et al. 2002). Par contre, d'autres auteurs rapportent soit l'absence de changement (Wilson et Horowitz, 1987 ; Kraemer et al. 1990, 1991, 1995b ; Dall et al. 2001 ; Nindl et al. 2001 ; Mejri et al. 2004, 2005), soit la baisse de concentration d'IGF-

I (Smith et al. 1993 ; Jahreis et al. 1991 ; Koistinen et al. 1996 ; Eliakim et al. 1998). Il apparaît que la réponse d'IGF-I dépend du type de l'exercice et du profil du sujet examiné (Duclos, 2001). Les exercices musculaires en résistance ne provoquent pas de modification de concentration d'IGF-I (Kraemer et al. 1990, 1991, 1995b), inversement les exercices en endurance induisent une réponse positive (Rosenfeld et al. 1994 ; Schwarz et al. 1996; Manetta et al. 2002). Des résultats obtenus par Nguyen et al. (1998) illustrent cette variabilité dans la réponse d'IGF-I après un exercice musculaire intense d'une durée de 20 min. Ces auteurs observent une augmentation de 12% lors d'un exercice progressif sur bicyclette ergométrique, une baisse de 15% chez des pratiquants de ski nordiques et pas de changement chez des joueurs de football de niveau régional.

La relation entre la réponse de GH à l'exercice et l'IGF-I n'est pas clairement définie dans la littérature. Cette variation est d'autant plus observée lorsqu'on inhibe l'augmentation de la sécrétion de GH en faisant précéder l'exercice par un repas riche en lipides (Cappon et al. 1994) ou chez des sujets insuffisants hypophysaires (Bang et al. 1990). De plus, Brun et al. (1996) et Orsetti et al. (1996) trouvent chez des gymnastes, lors d'une étude longitudinale, que l'évolution du pic de GH à l'exercice est négativement corrélée aux variations d'IGF-I. Bang et al. (1990), Kraemer et al. (1995b) et Schwarz et al. (1996) remarquent aussi que la réponse positive d'IGF-I à l'exercice n'est pas associée à une augmentation de GH. Le mécanisme de cette variation d'IGF-I, GH indépendante n'est pas encore clairement déterminé, mais il pourrait être expliqué en partie par une réduction du volume plasmatique avec hémococoncentration et viscosité accrue du sang (Monnier et al. 2000). Schwarz et al. (1996) accordent une signification physiologique concrète à ces résultats. Lors d'un exercice de 10 minutes à 80% de VO₂max, ils ont observé chez des sujets non entraînés que l'activité protéolytique d'IGFBP-3 augmentait de 44%. Vu que seulement 1% de l'IGF-I circule sous sa forme libre et que la majeure partie est liée à des protéines porteuses, représentées principalement par l'IGFBP-3 ; cela signifie qu'en fait la fraction libre d'IGF-I biologiquement active augmente de façon importante au cours de l'exercice. Ces modifications pourraient représenter un des mécanismes expliquant les effets anaboliques de l'exercice musculaire. Cependant, une étude de Dall et al. (2001) ne note pas de modification de l'activité protéolytique d'IGFBP-3 après un exercice submaximal chez des rameurs de haut niveau. De même, Rosenfeld et al. (2002) observent une augmentation de l'activité protéolytique d'IGFBP-3 seulement chez les sujets non entraînés après 11 semaines d'entraînement. Elle est associée à une diminution de l'IGF-I libre. Ces résultats montrent

qu'une période de 11 semaines d'entraînement affecte différemment l'activité protéolytique d'IGFBP-3 des sujets entraînés et non entraînés. Un certain seuil de stress physiologique relatif doit être dépassé pour que l'activité protéolytique d'IGFBP-3 puisse se produire chez les sujets entraînés (Rosendal et al. 2002).

IV.3.2.2.Effet de l'entraînement

Les travaux ayant trait à l'influence de l'entraînement sur la réponse d'IGF-I présentent des divergences. La majorité des études fait état d'une augmentation de concentration d'IGF-I plasmatique au repos avec l'entraînement (Hagberg et al. 1988 ; Kelly et al. 1990 ; Poehlman et Copeland, 1990 ; Poehlman et al. 1994 ; Roelen et al. 1997 ; Koziris et al. 1999 ; Eliakim et al. 2001). Cependant, d'autres auteurs notent, soit une absence de changement (Zaccaria et Eliakim et al. 2001), soit une baisse de concentration d'IGF-I (Jahreis et al. 1991 ; Eliakim et al. 1996, 1998 ; Bouix et al. 1997 ; Chicharro et al. 2001 ; Rosendal et al. 2002 ; Filiaire et al. 2003). Il semble que la pratique régulière d'exercice sans caractère excessif, lors de l'entraînement, induit de façon chronique une augmentation des concentrations aussi bien d'IGF-I totale (Kelly et al. 1990 ; Poehlman et Copeland, 1990 ; Koziris et al. 1999) que libre au repos (Koziris et al. 1999).

Certains niveaux d'activité physique trop intense sont cependant susceptibles d'entraîner une réduction prolongée des concentrations d'IGF-I (Suikkari et al. 1989 ; Jahreis et al. 1991 ; Orsetti et al. 1996 ; Bouix et al. 1997 ; Peyreigne et al. 1997 ; Chicharro et al. 2001 ; Filiaire et al. 2003). Ainsi, Eliakim et al. (2002) ont mis en évidence une évolution simultanée des concentrations plasmatiques d'IGF-I et les scores d'une auto-estimation de l'état physique chez des joueurs de handball de haut niveau soumis à 4 semaines d'entraînement. Les deux paramètres baissent lorsque l'entraînement est intense et augmentent quand il est modéré. D'autres parts, Filiaire et al. (2003) ont constaté que la concentration d'IGF-I s'abaisse lorsque la charge d'entraînement s'accroît de 15% chez des gymnastes féminines de haut niveau soumises à une période de 16 semaines. Des concentrations abaissées d'IGF-I ont été constatées également lors de carences nutritionnelles qu'il s'agisse de vraie carence (Thissen et al. 1994 ; Smith et al. 1995) ou de carence induite par une inadéquation entre apport et dépense énergétique augmentée par l'activité physique (Suikkari, 1989 ; Bouix et al. 1997 ; Filiaire et al. 2003).

L'adaptation d'IGF-I à l'entraînement dépend aussi de la durée de celui-ci. Eliakim et al. (1998) émettent l'hypothèse que cette adaptation d'IGF-I à l'entraînement est bidirectionnelle : la première est de type catabolique lorsque la période d'entraînement est relativement courte, de 3 jours à 5 semaines. La seconde est de type anabolique quand l'entraînement se prolonge sur une période allant au-delà de 5 semaines. Cette hypothèse semble être confirmée chez l'animal mais les résultats sont moins constants chez l'homme. Des travaux réalisés chez le rat ont montré qu'une longue période d'entraînement (4 à 9 semaines) augmente l'expression du gène d'IGF-I dans le muscle squelettique (Zanconato et al. 1994) et la concentration d'IGF-I circulante (Yeh et al. 1994).

L'IGF-I est un bon marqueur de forme physique des sportifs (Brun et al. 1996 ; Bouix et al. 1997 ; Manetta et al. 2002). Cette somatomédine-C circulante est fortement corrélée à l'aptitude aérobie, mesurée généralement par la VO_{2max} ou la puissance aérobie W170 (PW-170) (Kelly et al. 1990 ; Poehlman et Copleland, 1990 ; Eliakim et al. 2001 ; Manetta et al. 2002). Chez des gymnastes, Brun et al. (1996) et Bouix et al. (1997) ont observé des corrélations significatives entre l'IGF-I circulante et la force isométrique de préhension. En parallèle, ces concentrations d'IGF-I sont corrélées aussi à la masse osseuse qui est maintenue conjointement avec la fonction musculaire (Kelly et al. 1990 ; Nebigh et al. 2009). De même, Eliakim et al. (1996, 2001, 2009, 2010), Schmikli et al. (2012) ont mentionné chez des jeunes adolescentes, de fortes corrélations entre les composantes de l'aptitude, aussi bien fonctionnelle (VO_{2max}) que structurelles (volume du muscle de la cuisse) et les composantes de l'axe GH/IGF (pulses journalier de GH, GHBP et IGF-I). Ces auteurs suggèrent que l'aptitude physique de ces adolescentes est associée à une adaptation du système GH/IGF, favorable à l'anabolisme.

Résumé :

L'IGF-I, ou Somatomédine-C joue un rôle majeur dans de nombreux processus physiologiques (Stewart et Rotwein, 1996). Ce facteur de croissance a une production circadienne continue liée à une demi-vie relativement longue d'environ 6 heures (Jorgensen et al. 1989). Ses taux circulants sont régulés par la GH et l'état nutritionnel (Thissen et al. 1994 ; Smith et al. 1995). Selon les auteurs, il y a une divergence sur la réponse d'IGF-I plasmatique à l'exercice musculaire. Certains auteurs montrent une élévation (Chicharro et al. 2001 ; Dall et al. 2001 ; Manetta et al. 2002) d'autres rapportent soit l'absence de changement (Kraemer et al. 1995 ; Dall et al. 2001 ; Nindl et al. 2001 ; Mejri et al. 2004, 2005) soit la baisse de concentration d'IGF-I (Smith et al. 1993 ; Koistinen et al. 1996 ; Eliakim et al. 1998). De même, les travaux ayant trait à l'influence de l'entraînement sur la réponse d'IGF-I présentent des divergences. La majorité montre une augmentation de concentration d'IGF-I au repos avec l'entraînement (Kelly et al. 1990 ; Poehlman et al. 1994 ; Roelen et al. 1997 ; Koziris et al. 1999 ; Eliakim et al. 2001). Cependant, d'autres auteurs notent, soit une absence de changement (Zaccaria et Eliakim et al. 2001), soit une baisse de concentration d'IGF-I (Bouix et al. 1997 ; Chicharro et al. 2001 ; Rosendal et al. 2002 ; Filiaire et al. 2003).

IV.3.3. Protéine porteuse d'IGF-I (IGFBP-3)

Les six protéines porteuses ou Insulin-like Growth Factor Binding Proteins (IGFBPs) d'IGF-I et d'IGF-II (Shimasaki et al., 1991 ; Rosenfeld et al., 1994) restent encore peu étudiées dans le contexte de l'activité sportive. Pour les deux principales connues pour les somatomédines, l'IGFBP-3 reflète l'action anabolique globale de l'axe somatotrope (Blum et al., 1990, 1993 ; Rosenfeld et al., 1994) alors que l'IGFBP-I est plutôt dépendante du statut nutritionnel et inversement corrélée à l'insuline (Brisman et Hall, 1993). Toutes deux prolongent la durée de vie des facteurs de croissance ou IGFs ; elles servent de vecteur des IGFs dans la circulation, et modulent leurs actions biologiques de manière autocrine et/ou paracrine (Rosenfeld et al., 1994 ; Koistinen et al., 1996). L'IGFBP-3, qui est synthétisée dans de nombreux tissus, est considérée comme le transporteur majeur de l'IGF-I (Koistinen et al., 1996). L'association de cette protéine de transport à l'IGF-I forme un complexe de haut poids moléculaire (150 kDa) qui a une durée de vie de 14 à 18 heures, tandis que les complexes de 40 à 50 kDa dont l'IGFBP-I n'ont que 30 minutes de demi-vie. Les IGFBPs ont un rôle probablement majeur dans le contexte de l'adaptation du muscle à l'exercice et son approvisionnement en glucides, puisqu'on prête à l'IGFBP-I (Lewitt et al., 1991) et à l'IGFBP-3 (Clark et al., 1993) un effet modulateur de l'action hypoglycémiante (insulin-like) d'IGF-I. Ainsi, l'effet cicatrisant d'IGF-I est augmenté expérimentalement chez le rat par une administration conjointe d'IGFBP-3 (Hamon et al., 1993).

IV.3.3.1. Effet de l'exercice

Les études ayant trait aux effets de l'exercice physique sur les protéines de transport des IGFs rapportent généralement des augmentations de concentration de l'IGFBP-3 (Ngyuen et al., 1998 ; Koziris et al., 1999 ; Manetta et al., 2002 ; Nebigh et al., 2009 ; Nemet et al., 2010). Cependant, les exercices intenses de courte durée (Schwarz et al., 1996 ; Dall et al., 2001) ou submaximaux (Mejri et al., 2004) n'affectent pas la concentration plasmatique d'IGFBP-3. L'étude de Koistinen et al. (1996) ne fait pas état de modifications d'IGFBP-3 après un marathon, mais la concentration de cette protéine de transport baisse lors des trois jours suivants l'épreuve. Chez des jeunes gymnastes comparés à un groupe témoin au cours d'un exercice submaximal de 15 minutes, Bouix et al. (1997) ont observé que la concentration d'IGFBP-3 est plus basse chez les gymnastes et s'abaisse encore de 16% après 6 mois d'entraînement. La diminution de cette protéine porteuse des somatomédines, représentative de la protéolyse d'IGFBP-3 (Rosendal et al., 2002), aurait un effet sur l'augmentation de la

disponibilité en IGF-I au niveau des tissus. Elle favorise les effets de cette somatomédine sur l'utilisation musculaire des substrats et/ou l'anabolisme cellulaire et compenserait en partie le déficit énergétique relatif et la chute des concentrations d'IGF-I (Bouix et al. 1997).

IV.3.3.2. Effet de l'entraînement

Les conclusions portant sur l'effet de l'entraînement sur l'IGFBP-3 présentent également des divergences.

La majorité des études ne fait pas état de modification des concentrations plasmatiques d'IGFBP-3 de repos avec l'entraînement (Eliakim et al. 1998 ; Chicharro et al. 2001 ; Rosendal et al. 2002). Cependant, Koziris et al. (1999) et Kraemer et al. (1999) observent une augmentation significative de concentration d'IGFBP-3. Inversement, on note des diminutions d'IGFBP-3 chez des sédentaires (Eliakim et al. 1996) et chez les sportifs (Eliakim et al. 2001) à l'issue, dans les deux cas, d'une période d'entraînement de 5 semaines. Rosendal et al. (2002) font état d'une diminution initiale d'IGFBP-3 lors des 4 premières semaines des 11 semaines d'entraînement chez des sujets non entraînés. La poursuite de l'entraînement induit une augmentation d'IGFBP-3 jusqu'à ce qu'elle retrouve la valeur basale à la fin de cette période. Par ailleurs, ces auteurs ne notent pas de modification des concentrations d'IGFBP-3 chez des sujets bien entraînés. Il semble que le niveau initial d'entraînement représenterait un déterminant majeur de la réponse d'IGFBP-3 à l'exercice. Un seuil de stress physiologique relatif à l'entraînement physique prolongé est nécessaire selon Rosendal et al. (2002) pour provoquer une diminution d'IGFBP-3 chez des sportifs bien entraînés. Chez des gymnastes de haut niveau après une période d'entraînement de 16 semaines l'IGFBP-3 s'abaisse (Filaire et al. 2003). Ces auteurs ont associé cette diminution d'IGFBP-3 à une élévation de 15% de la charge d'entraînement. Il est probable que l'entraînement dans les limites tolérables de l'organisme augmente la concentration plasmatique d'IGFBP-3, inversement la pratique à caractère excessif induit une inhibition de la concentration de cette protéine porteuse des IGFs (Peyreigne et al. 1997).

En faveur de cette hypothèse, des corrélations négatives ont été observées entre IGFBP-3 et score de surentraînement chez des footballeurs et des volleyeurs de haut niveau (Orestti et al. 1996 ; Aïssa et al. 1999). Des concentrations abaissées d'IGFBP-3 ont été constatées également lors de carences nutritionnelles relatives à l'entraînement (Brun et al. 1995 ; Filaire et al. 2003).

L'IGFBP-3 est considérée comme un indicateur endocrinien de la bonne forme physique du sportif (Bouix et al. 1997 ; Peyreigne et al. 1997 ; Manetta et al. 2002), car elle est corrélée à la VO₂max (Brun et al. 1995,1996 ; Manetta et al. 2002). De même, de fortes corrélations ont été trouvées entre cette protéine porteuse des somatomédines et la force isométrique de préhension (Brun et al. 1995, 1996 ; Bouix et al. 1997). Elle est plus étroitement corrélée à la force isométrique de préhension que l'IGF-I (Brun et al. 1996).

Résumé

L'IGFBP-3, qui est synthétisée dans de nombreux tissus, est considérée comme le transporteur majeur de l'IGF-I (Koistinen et al. 1996). L'association de cette protéine de transport à l'IGF-I forme un complexe de haut poids moléculaire (150 kDa) qui a une durée de vie de 14 à 18 heures. Les études ayant trait aux effets de l'exercice physique sur les protéines de transport des IGFs rapportent généralement des augmentations de concentration de l'IGFBP-3 (Koziris et al. 1999 ; Manetta et al. 2002 ; Nebigh et al. 2009 ; Nemet et al. 2010). Les conclusions portant sur l'effet de l'entraînement sur l'IGFBP-3 présentent également des divergences (Chicharro et al. 2001 et Rosendal et al. 2002 ; Koziris et al. 1999 ; Kraemer et al. 1999 ; Eliakim et al. 2001). L'IGFBP-3 est considérée comme un indicateur endocrinien de la bonne forme physique du sportif (Bouix et al. 1997 ; Peyreigne et al. 1997 ; Manetta et al. 2002).

SYNTHESE ET ORIENTATION DU TRAVAIL

De nos jours le football comme beaucoup d'autres sports a beaucoup évolué au cours des dernières années, il est considéré comme le sport le plus populaire dans le monde surtout auprès des enfants et des adolescents. L'observation et la caractérisation de certains paramètres anthropométriques, physiologiques et physiques chez les jeunes joueurs footballeurs permettent de distinguer les joueurs élites des non élites (Reilly et al. 2000; Gil et al. 2007a). Elles permettent aussi de déterminer, au moins, un profil de référence en fonction de la position de jeu ou de la catégorie d'âge (Le Gall et al. 2010 ; Wong et al. 2009). Des études antérieures, surtout au niveau européen, ont montré que le profil des joueurs diffère selon le poste de jeu (Bangsbo, 1994 ; Reilly et al. 2000 ; Sporis et al. 2009). Toutefois, en Europe, le processus de développement des jeunes footballeurs élites se caractérise par des charges d'entraînements élevées en termes de volume (fréquence et durée des séances), qui peuvent modifier le profil du joueur en fonction de la position de jeu. Au niveau Africain, peu d'études longitudinales pour ne pas dire aucune ne s'est intéressée à étudier l'effet de l'entraînement de football sur les paramètres anthropométriques, physiologiques et physiques des joueurs élites et d'établir ainsi un profil type du joueur en fonction du poste de jeu. Par conséquent, dans notre première étude nous avons étudié l'évolution de certains paramètres anthropométriques, physiologiques et physiques de jeunes joueurs footballeurs élites tunisiens au cours d'une saison en fonction de leurs positions de jeu.

Par ailleurs, peu d'informations sont actuellement disponibles montrant l'effet de l'entraînement sur les caractéristiques anthropométriques et les performances physiques des jeunes footballeurs pubères à long terme (Le Gall et al. 2010). De plus, la majorité de ces études n'ont pas tenu compte de l'effet de la maturation pubertaire. Ainsi, il semble important de clarifier les rôles respectifs de l'entraînement et de la croissance pubertaire sur les caractéristiques anthropométriques et le potentiel physique de jeunes footballeurs élites. Par conséquent, l'objectif de notre seconde étude est d'évaluer les caractéristiques anthropométriques et les performances physiques des jeunes footballeurs élites durant une saison d'entraînement de football en comparaison avec des sujets contrôles non élites.

En relation avec le système nerveux et le système circulatoire, le système endocrinien coordonne l'action des cellules et des organes. Il joue un rôle important dans la mobilisation et l'utilisation des substrats énergétiques afin d'assurer la régulation du métabolisme énergétique (Bouassida et al. 2003; Bouhlef et al. 2008; Elloumi et al. 2008). L'entraînement intense et la compétition sportive sont souvent associés à des déficits endocriniens chez les

femmes et les hommes. De plus, l'entraînement physique intense peut altérer le développement pubertaire normal des athlètes (Theintz et al. 1993 ; Kanaley et al. 1997). Il perturbe l'homéostasie des cellules et peut représenter ainsi un facteur de stress pour l'organisme. Ainsi, les avantages d'un entraînement intense sont beaucoup moins évidents (Weltman et al. 1997). L'entraînement intensif en sport ainsi que les compétitions sont souvent associés à des déficits endocriniens chez les hommes adultes (Tanskanen et al. 2011). Chez les jeunes athlètes, le stress de l'entraînement physique intense, combiné à la restriction calorique, peuvent altérer l'homéostasie cellulaire et le développement normal pubertaire (Roemmich et al. 2001 ; Adiyaman et al. 2004). Le préjudice à long terme ou le bénéfice d'un entraînement intense chez les adolescents n'est pas encore élucidé (Roemmich et al. 2001). C'est pour toutes ces raisons que nous avons jugé utile au cours de notre troisième et quatrième étude d'évaluer, chez des jeunes footballeurs de haut niveau et des sujets contrôles de même âge biologique, l'effet de deux saisons d'entraînement en football, sur les réponses hormonales de l'axe somatotrope et de l'axe cortico-gonadotrope en fonction de la période de la saison et en relation avec la charge d'entraînement.

CONTRIBUTION PERSONNELLE

I. METHODOLOGIE GENERALE

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre de la collaboration entre le laboratoire Mouvement Sport Santé (M2S), UFR-APS, Université Rennes 2 (France) et le laboratoire « Adaptations Cardio-Circulatoires, Respiratoires, Métaboliques et Endocriniennes à l'Exercice Musculaire », Faculté de Médecine de Sousse (Tunisie).

Le protocole expérimental a été réalisé avec l'accord du comité d'éthique de l'hôpital « LaRabta » de Tunis et était mené en accord avec la déclaration d'Helsinki.

Les objectifs et les modalités des études ont été expliqués aux participants accompagnés de leurs parents lors d'une réunion d'information. Un consentement signé a été obtenu de chacun des participants ainsi que de leurs parents.

Préalablement à l'expérimentation, tous les sujets ont visité les lieux de l'expérimentation et ont été familiarisés avec le personnel ainsi qu'avec le matériel utilisé.

Les études ont été réalisées lors des saisons sportives 2008/2009 et 2009/2010.

I.1. Les sujets

Soixante-six adolescents de sexe masculin ont participé à ce travail de Thèse. Ils ont été répartis en deux groupes : Groupe Expérimental (GE ; $n = 40$) et Groupe Témoin (GT ; $n = 26$).

I.1.1. Groupes expérimentaux (GE)

Le GE est formé de 40 jeunes footballeurs élités (âge moyen : $14,5 \pm 0,4$ ans) au début de l'expérimentation, faisant partie de la liste élargie de l'Equipe Nationale de Tunisie des moins de 17 ans.

Ces jeunes footballeurs résidaient en permanence durant 2 années successives au Centre National de préparation de l'élite (CNPE) de Borj-Cédria sous l'égide de la Fédération Tunisienne de Football et le Ministère des Sports Tunisien. Les sujets du GE étaient sélectionnés parmi un total de 800 footballeurs appartenant aux six centres régionaux de la préformation. Le GE s'entraîne depuis au moins 5 ans à raison de 11 mois par an, avec un travail hebdomadaire de 5 à 7 séances par semaine avec une compétition le dimanche en plus

des stages à l'étranger et des matchs internationaux. Nos sujets sont des élèves qui pratiquent en plus de l'entraînement en football deux séances d'éducation physique par semaine à raison d'une heure pour chaque séance. La durée de la séance d'entraînement de football de GE au sein du CNPE dure en moyenne 1h 30 minute: 15 à 20 minutes d'échauffement général et spécifique, 15 à 20 minutes de travail technique avec ballon, 20 à 30 minutes d'application tactique et 10 minutes de retour au calme (**Figure 5**).

Figure 5 : Exemple d'une semaine type d'entraînement des jeunes footballeurs élités.

Semaine Type d'entraînement								
		Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
MATIN	7h30	Petit déjeuner standardisé					Repos	Petit déjeuner du jour de la compétition
	9 h		E P		E P			
Midi		Déjeuner standardisé au centre de borj cédria					Repos	
Après Midi	18 h 30	E A	E TT	E TT	M1	E TT		M2
	19 h 30	Séance Sauna / Jacuzzi						

EP : Entraînement Physique ; EA : Entraînement Aérobic ; E TT : Entraînement Technico-Tactique ; M1 : Match amical ; M2 : Match officiel.

A la fin de la première année de formation au CNPE tout l'effectif (40 sujets) de notre GE a participé à l'étude numéro 1 de notre travail alors que 24 seulement sont choisis pour participer aux études 2, 3 et 4.

1.1.2. Groupe témoin (GT)

Le groupe témoin (GT) est formé de 26 jeunes élèves (âge moyen : $14,3 \pm 0,3$ ans) au début de l'étude, qui pratiquent une activité physique scolaire à raison de deux séances par semaine d'une durée d'une heure chacune. Tous les sujets remplissent un consentement parental dans lequel ils mentionnent leur passé médical, les traitements éventuellement pris, les antécédents de maladies, les maladies chroniques susceptibles d'influencer l'activité

physique. Les enfants du GT qui participaient à ce travail étaient sélectionnés au hasard dans des collèges avoisinants le CNPE.

I.2. Protocole expérimental

I.2.1 Les mesures anthropométriques

♦ Visite médicale

Une visite médicale approfondie est réalisée au sein du Centre National de Médecine du Sport, ainsitous les sujets remplissaient un questionnaire dans lequel ils mentionnaient leur passé médical, les traitements éventuellement pris, les antécédents de maladie.

♦ Évaluation des stades pubertaires

Les stades pubertaires étaient déterminés et enregistrés par un endocrinologue selon la méthode de Tanner (Tanner, 1975). Les enfants des stades 1 à 5 étaient évalués. Lapré puberté, la péri puberté et la post-puberté correspondaient respectivement aux stades (1), (2,3) et (4,5).

♦ Les Mesures anthropométriques:

La masse corporelle et la taille ont été mesurés pour chaque sujet, en utilisant respectivement : une balance électronique à colonne sans fil SECA 704 Classe III Médicale (Ref : SECA 704) et une toise télescopique pour pèse personne à garde-corps Seca–Ref : 223-1717-999). La masse corporelle était appréciée à 0,1 kg près et la taille à 0,1 cm près.

Le pourcentage de masse grasse (%MG) est estimé à partir de quatre plis cutanés (pince de Harpenden) (bicipital, tricipital, sous-scapulaire et supra-iliaque).

♦ Calendrier du protocole

Chez les deux groupes (GE et GT), des mesures anthropométriques, des tests de terrain ainsi que des prélèvements sanguins ont été réalisés, sur cinq périodes, tout au long de ces deux années d'étude selon le planning suivant :

* En **2008/2009**, des mesures anthropométriques, des tests de terrain et des prélèvements sanguins ont été effectués en trois temps:

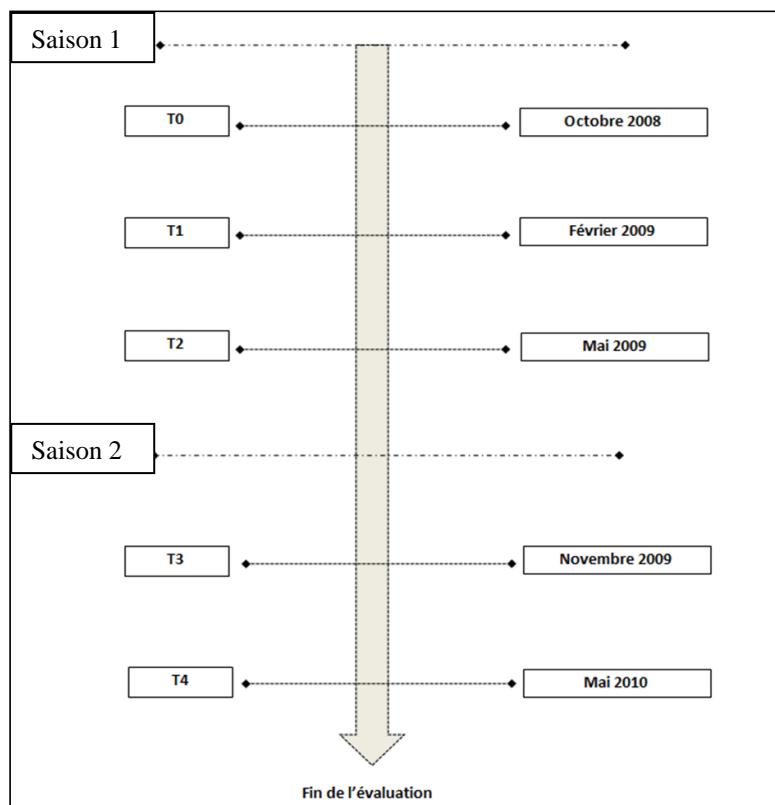
-T0 en octobre 2008; -T1 en février 2009 ;-T2 en mai 2009.

* En **2009/2010**, le même schéma expérimental a été effectué en deux temps :

-T3 au moi de novembre 2009;- T4 en moi de mai 2010.

Il est important de noter ici que l'ensemble des mesures et tests à chaque période ont été effectués par les mêmes opérateurs afin d'éviter tout problème de reproductibilité.

Figure 6 :Calendrier du protocole expérimental (cinq périodes).



♦ **La semaine des tests des évaluations:**

Les sujets du GE quittent le CNPE le samedi après midi et le réintègre le dimanche soir après avoir joué un match au sein de leurs clubs. Tout au long de la semaine, les sujets se réveillent à 7h du matin pour prendre le petit déjeuner et commencent leurs scolarités à partir

de 8h jusqu'au 17h, avec une pause de deux heures entre 12h et 14h, pour prendre le déjeuner et se reposer un peu. Les entraînements commencent le lundi à 18h30 avec un travail aérobique léger suivi par un sauna et jacuzzi.

Le mardi c'est le premier jour des tests, les participants des deux groupes (GE et GT) réalisent tous les mesures anthropométriques (Taille, Poids et %G) à 7h du matin alors que la première partie des tests physiques (Vitesse 5,10 et 30m ; SJ, CMJ et 5JT) sont faites à partir de 18h30.

Le mercredi, les sujets de GE s'entraînent normalement à 18h30 suivant le planning hebdomadaire programmé. (Voir Figure 5).

Le jeudi, c'est le deuxième jour pour réaliser la deuxième partie des tests physiques (YYIRTL1) toujours à partir de 18h30 pour les deux groupes.

Le vendredi les jeunes élites du GE suivent l'entraînement régulier et le samedi matin à 7h sera réservé pour les prélèvements sanguins pour les deux groupes.

Il faut signaler que pendant la semaine des tests d'évaluation et la semaine précédente, la charge d'entraînement pour le groupe GE est allégée, et ceci en éliminant les deux séances matinales du mardi et du jeudi ainsi que le match amical.

I.2.2. Description des Aptitudes Physiques

I.2.2.1. Puissance maximale des membres inférieurs :

La puissance musculaire des membres inférieurs est considérée comme un des facteurs déterminants de la performance chez les footballeurs (Ekblom, 1986 ; Leatt et al. 1987 ; Brevet et Davis, 1992 ; Capranica et al. 1992 ; Garganta et al. 1992). On cherche aujourd'hui à évaluer sur le terrain la qualité de détente et d'élasticité des athlètes, pour cela, on utilise des tests qui ont été introduits par Bosco (Bosco et al. 1996) dans le domaine de l'entraînement. Les tests les plus simples sont le Squat-Jump(SJ) et le Countermovement Jump(CMJ).

Le SJ vise à mesurer la détente sèche non pliométrique et sans étirement : le sujet commence donc le test en position fléchit à 90° (articulation des genoux), pour effectuer une poussée maximale vers le haut. Les mains sont sur les hanches pour éviter une participation des bras.

Le CMJ s'effectue dans les mêmes conditions, mais cette fois le sujet est autorisé à effectuer une flexion préalable à l'extension (il s'agit donc, cette fois d'un test pliométrique). La différence entre la CMJ et le SJ rend compte de la qualité élastique du muscle et de la coordination du sujet. Le CMJ, peut s'effectuer également avec l'aide des bras, ce qui permet une action d'étirement musculaire supérieure, mais ce qui exige également une bonne coordination des bras.

Ces tests étaient réalisés au laboratoire à l'aide d'un optojump (optojump microgate, Italy).

Les sujets ont réalisé une épreuve de cinq-jump-test (5J) composée de cinq sauts successifs en cherchant à réaliser la plus grande distance possible (Chamari et al. 2008).

Le SJ, le CMJ et le 5J ont été réalisés trois fois par chaque sujet avec 1 minute de repos entre chaque essai et la meilleure performance a été retenue comme valeur d'analyse.

I.2.2.2.Vitesse de Course

Le temps nécessaire pour courir 5m (T5), 10m (T10) et 30m (T30) a été mesuré avec des cellules photoélectriques (Cell kit Speed Brower, USA).

Principe : Exécuter 3 fois un sprint de 30m avec des temps intermédiaires mesurés à 5m et à 10m sur une piste en tartan. Les trois répétitions, ont été séparées par une récupération de 5 minutes. La meilleure performance sur 30m avec les temps correspondants à 5m et 10m a été retenue pour analyse. Les sujets étaient invités et encouragés à courir le plus vite possible.

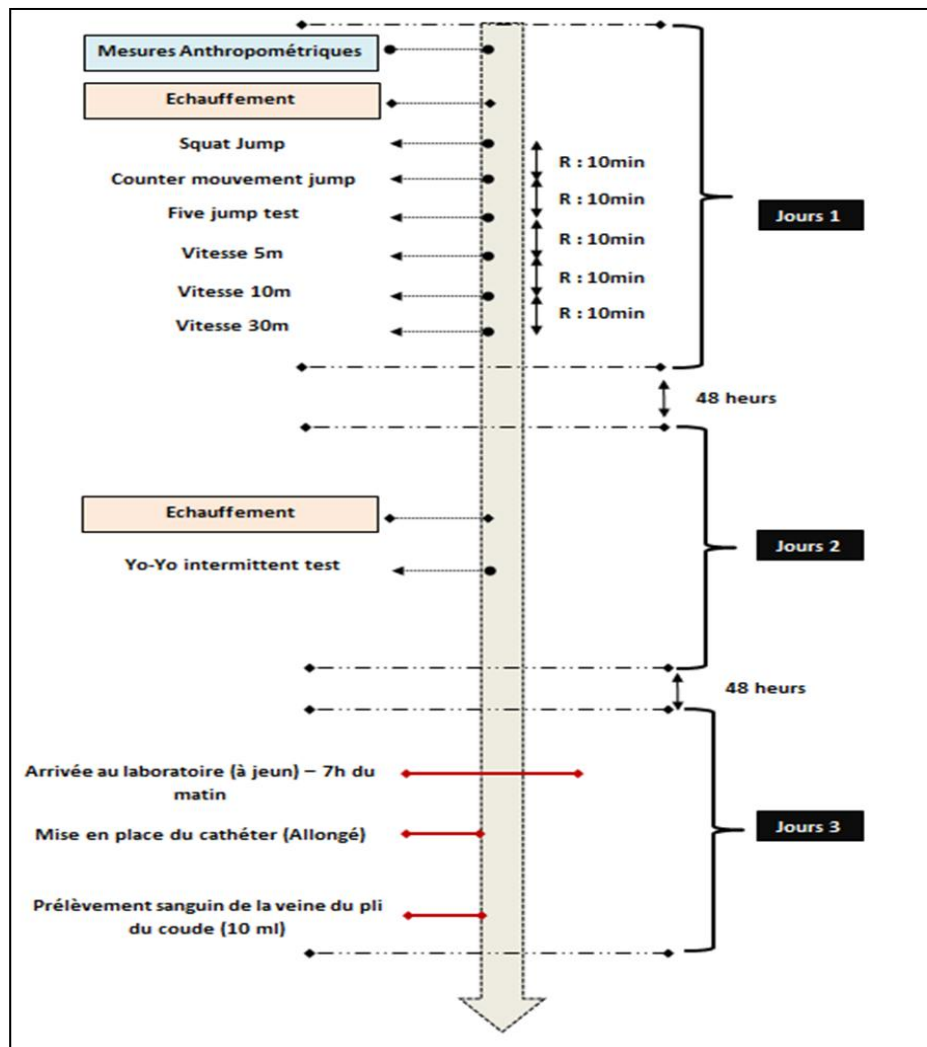
I.2.2.3. Estimation du potentiel aérobic

Pour estimer le potentiel aérobic des sujets nous avons utilisé le YoYo Intermittent Recovery Test level1 (YYIRTL1) (Krustrup et al. 2003).

Ce test intermittent est constitué de périodes d'effort entrecoupées par des périodes de récupération. Le sujet est appelé à courir en allé et retour sur une distance de 20m à une vitesse indiquée par un flash disc MP3, qui émet des bips sonores à des intervalles de temps donnés. Durant des périodes de récupération (10s), le sujet réalise un aller-retour en marchant dans une zone de récupération de 5m. Le test prend fin lorsque le sujet est incapable de suivre

la vitesse imposée deux fois de suite à plus de 3 m de la ligne de 20m au moment de l'émission de bips. Ce test est réalisé sur un terrain en gazon naturel.

Figure 7 : Protocole expérimental de l'étude pour une période de suivi.



I.2.3. Déroulement des tests physiques

I.2.3.1. Le premier jour (J1)

Après un échauffement standardisé durant lequel le sujet devait réaliser 15 minutes de course légère, suivi de 5 min d'exercices techniques, 2 ou 3 accélérations puis 5 minutes d'étirement. Les sujets ont réalisé, respectivement, les tests du SqJ, CMJ, Five Jump Test (5JT), Vitesse : 5m – 10m – 30m. Les tests ont été entrecoupés par des périodes de récupération de 10 min afin de permettre une récupération totale et atteindre les meilleures performances lors de la réalisation de chaque test.

I.2.3.2. Le deuxième jour (J2):

Au cours du 2^{ème} jour (J2) des tests, les sujets ont réalisé le Yo-Yo intermittent test level 1 (Krustrup et al. 2003). Les sujets ont effectué les mêmes procédures d'échauffement avant de commencer les tests.

Tous les tests étaient réalisés dans les mêmes conditions. La vitesse du vent sur piste était contrôlée avec un anémomètre (Kestrel 1000, Nielsen-Kellerman, USA) au départ de chaque test : au dessus d'une vitesse de 2 m.s^{-1} , les tests étaient reportés.

I.2.4. Les prélèvements sanguins

Les prélèvements sanguins étaient effectués pendant la semaine des tests physiques le matin entre 7h et 8h au repos et à jeun depuis 12h. Il a été demandé à chaque sujet de s'abstenir de tout entraînement intense ou épuisant durant les 24 heures précédentes et des précautions diététiques (abstention de bananes, vanille, café, thé...) devaient être impérativement observées la veille de l'expérience. Dès l'arrivée au laboratoire, le sujet est allongé pour la mise en place d'un cathéter héparine dans une veine du pli du coude destiné à prélever les échantillons sanguins. 15 ml de sang veineux furent prélevés sur des tubes renfermant de l'EDTA (éthylènediaminetétracétique).

Les échantillons de sang veineux collectés furent immédiatement placés dans de la glace puis centrifugés pendant 10 minutes à 4° à 3000 tours par minute. Le plasma décanté est séparé puis congelé à -80° jusqu'au moment des différents dosages.

I.2.5. Les différents dosages biologiques

Les dosages étaient effectués au Service de Physiologie et d'Exploration Fonctionnelle de l'hôpital FarhatHached de Sousse (Tunisie).

L'hormone de croissance (GH) était dosée par chimioluminescence (Immulite, Diagnostic Products Corp., Los Angeles, CA, États-Unis). Le seuil de sensibilité du dosage était de 0,1 ng/ml. Le coefficient de variation inter essais (CV1)=14% et le coefficient de variation intra essais (CV2)=1.5%.

Les concentrations sériques d'IGF-1 étaient mesurées par la trousse IRMA d'extraction d'IGF-1 (Diagnostic Systems Laboratories, Webster, TX, États-Unis). La sensibilité

théorique, ou limite minimum de détection, calculée par interpolation de la moyenne plus 2 S.D. de 20 répliques du standard 0 ng/ml, était de 2 ng/ml. Les coefficients de variabilité inter-dosage étaient de 7,4 et de 4,2, respectivement, pour des concentrations de 35,54 et 383,86 ng/ml. Pour l'IGF-1 le CV1=6.8% et le CV2< 6.3%.

Les concentrations sériques d'IGFBP-3 étaient mesurées par la trousse de dosage Immunoradiometric (Diagnostic Systems Laboratories, Webster, TX, États-Unis). Le seuil inférieur de détection, calculé comme 2 S.D. de la moyenne de 22 répliques du standard 0 ng/ml d'IGFBP-3, était environ de 0,5 ng/ml. Pour l'IGFBP-3, le CV1=6.8% et le CV2=6%.

Les taux de testostérone totale et du cortisol étaient mesurés par RIA par une trousse de Diagnostic System Laboratories (DSL-4000). La sensibilité du dosage était de 0,08 ng/ml. Pour la testostérone, le CV1=7% et le CV2=7.5%.

Les taux de la SHBG étaient mesurés par la trousse de dosage « Technique immunologique ECLIA » (Diagnostic Systems Laboratories). La sensibilité du dosage était de 0,05 µg/ml.

I.2.6. Mesure de la perception de l'effort (RPE = Rating of Perceived Exertion)

Cette méthode de contrôle de la charge d'entraînement chez les joueurs d'équipe exige que chaque joueur fournisse une estimation de l'effort perçu (RPE) pour chaque séance d'entraînement (voir le tableau 1) avec une mesure de temps d'entraînement (Foster et al. 2001).

Pour calculer une mesure d'intensité de séance, les joueurs étaient invités dans les 30 minutes suivant la séance d'entraînement à répondre à une question simple comme « Comment avez vous ressenti votre séance d'entraînement ? » Un simple nombre représentant l'importance de la charge d'entraînement pour chaque session est alors calculé par la multiplication de l'intensité d'entraînement (RPE de tableau 1) par la durée de session d'entraînement (minutes).

$$\text{Charge d'entraînement} = \text{RPE séance} \times \text{durée (minutes)}$$

Par exemple, pour calculer la charge d'entraînement pour une séance d'entraînement d'une durée de 90 minutes avec une RPE de 5, le calcul suivant était réalisé :

Charge d'entraînement = 5 x 90 = 450 Unités Arbitraires (UA)

Tableau 25 : L'estimation de la charge perçue de l'effort (RPE) utilisée par les joueurs pour classifier l'intensité perçue de chaque session d'entraînement (Foster et al. 2001).

Estimation	Description
0	Nulle
1	Très, Très Légère
2	Légère
3	Modérée
4	Assez Dure
5	Dure
6	
7	Très Dure
8	
9	
10	Maximale

L'estimation de la charge d'entraînement par la méthode RPE a été utilisée par nos joueurs de football tout au long des deux années de suivis.

II. ANALYSE STATISTIQUE

Le traitement statistique des données fut réalisé sur microordinateur PC, au moyen du logiciel de traitement statistique : « SPSS.16 » pour Windows (Statistical Package for Social Science). Les moyennes et les déviations standards (SD) ont été calculées pour chaque paramètre.

Nous avons eu recours au model linéaire générale après avoir vérifié la normalité de la distribution des variables dépendantes et de la différence entre les deux groupes (expérimental et témoin) par le test de Kolmogorov–Smirnov. Nous avons testé la sphéricité de la matrice var/cov par le test W de Mauchly ; en cas de non-sphéricité, nous avons eu recours à la correction de Greenhouse-Geisser. Ainsi, nous avons utilisé une analyse de variance

(ANOVA) pour mesures répétées avec une correction Greenhouse-Geisser. L'effet multi varié des différentes périodes d'entraînement (5 périodes) a été analysé par le test de Lambda de Wilks qui est basé sur les comparaisons des paires linéairement indépendantes parmi les moyennes marginales estimées. Les comparaisons multiples ont été analysées par le post-hoc test de Bonferroni. L'étude de la relation bivariable entre les variables anthropométriques, physiques et physiologiques a été effectuée par le coefficient de corrélation de Pearson.

La significativité est acceptée pour $p < 0,05$.

LES ETUDES

I. ETUDE 1

Evolution des profils physiques et anthropométriques selon le poste de jeu chez des jeunes footballeurs élités: Etude longitudinale.

Physical and anthropometric profile according playing position in young elite soccer players: a longitudinal study.

Article soumis à Asian Journal of Sports Medicine (Décembre, 2012)

I.1. Introduction

Le football représente une activité multifactorielle. En effet, la performance dépend des paramètres techniques, tactiques, physiques, physiologiques et psychologiques (Bangsbo, 1994). Pour accéder au plus haut niveau avec succès, une condition physique très bien développée est nécessaire (Stølen et al. 2005 ; Castagna et al.2010). Optimiser le potentiel physique des jeunes joueurs footballeurs est l'un des principaux objectifs des académies de football et des centres de formation. En effet, le jeune footballeur élite doit être prêt à effectuer et à supporter des charges élevées d'entraînement observées au niveau de l'élite.

L'observation et la caractérisation de certains paramètres anthropométriques (taille, poids, % graisse) et physiques (consommation maximale d'oxygène, performance de sprint et de détente) chez des jeunes joueurs footballeurs élite, permettent de distinguer entre les joueurs élités et non élités (Jankovic et al. 1993 ;Gil et al. 2007a ;Reilly et al. 2000).Elles permettent aussi de déterminer, au moins, un profil de référence en fonction de la position de jeu (Gil et al. 2007b ;Wong et al. 2009 ; Carling et al. 2012) ou la catégorie d'âge (Le Gall et al. 2010 ; Wong et al. 2009).

Des études antérieures ont montré que le profil des joueurs est différent selon les postes de jeu chez les adultes élités (Bangsbo, 1994 ; Reilly et al. 2000 ; Sporis et al. 2009), en indiquant que les gardiens de but sont plus grands et plus lourds que les joueurs de champ. Hencken et al. (2006) ont ajouté que les milieux de terrain sont les joueurs de champ les plus petits et les plus légers alors que les défenseurs sont les plus grands et les plus lourds (Henckenet White, 2006). En outre, il existe également des différences physiologiques entre les positions de jeu en termes de $VO_2\text{max}$ sachant que les arrières et les joueurs du milieu ont les valeurs les plus élevées (Bangsbo, 1994, Sporis et al. 2009). Ces différences marquées en

termes d'anthropométrie et d'aptitude physiologique ou encore de performance physique peuvent potentiellement entraîner une spécialisation des jeunes joueurs selon les postes au cours de leurs formations dans les académies et les centres de formation.

Plusieurs études ont rapporté des informations concernant un profil de référence des jeunes footballeurs élites (le Gall et al. 2010 ; Malina et al. 2000 ; Reilly et al. 2000 ; Ford et al. 2012), mais elles n'ont pas réussi à établir un profil précis en fonction de la position occupée sur le terrain. En effet, Reilly et al. (2000) ont rapporté que chez les joueurs de la sélection U16 de l'Angleterre, des différences selon les postes sont observés au niveau anthropométrique, mais pas au niveau physiques ou au niveau de $VO_2\text{max}$ (Reilly et al. 2000).

Récemment, Wong et al. (2009) ont montré que chez des jeunes footballeurs chinois(U14), des différences anthropométriques selon les positions de jeu sont observées, mais aucune différence en terme de caractéristiques physiologiques. Ces résultats sont probablement dus à leur faible expérience d'entraînement en football (<5 ans), au nombre de séances (deux fois par semaine + un match) et à la durée d'entraînement ainsi que les matchs joués. D'après ces paramètres, il semble qu'il existe des différences entre les jeunes joueurs Chinois et Européens qui sont caractérisées par des charges d'entraînement plus élevées (5 à 7 séances par semaine + 1 match joué), une expérience d'entraînement supérieure en raison d'un processus de sélection avancé.

En Europe, le processus de développement des jeunes footballeurs élites se caractérise par des charges d'entraînements élevées dues à un volume élevé de formation, qui peuvent modifier le profil du joueur en fonction de la position de jeu. À notre connaissance, il n'existe aucune étude longitudinale qui s'est intéressée à l'effet de l'entraînement de football en Afrique sur les paramètres physiques et anthropométriques. Cette étude semble être nécessaire pour fournir des informations relatives aux réponses à l'entraînement footballistique de l'élitenord-africaine et d'établir un profil type du joueur en fonction du poste de jeu.

Par conséquent, le but de cette étude est d'examiner l'évolution de certains paramètres anthropométriques et physiques des jeunes joueurs footballeurs élites tunisiens au cours d'une saison au sein d'une académie de football, et de déterminer s'il existe des différences entre les jeunes joueurs footballeurs en fonction de leurs positions de jeu. Nous émettons l'hypothèse qu'il existe des différences en termes de paramètres anthropométriques et physiques des jeunes joueurs footballeurs élite en fonction de la position de jeu.

I.2. Méthode

Quarante footballeurs élités garçons ont été recrutés pour participer à notre étude (âge 15.3 ± 0.2) qui s'entraînent régulièrement au sein d'une académie de football. Ils ont été classés en 5 groupes en fonction de leurs positions de jeu: gardiens de but (GB, $n = 7$), défenseurs centraux (DEF C, $n = 10$), défenseurs latéraux (DEF L, $n = 6$), milieux de terrain (MIL, $n = 9$) et attaquants (ATT, $n = 8$). Les jeunes joueurs footballeurs ont été évalués 2 fois au cours de la saison footballistique, en T1 au début de la période de préparation et en T2 vers la fin de la saison compétitive. L'évaluation comportait les mesures anthropométriques (Taille, Masse corporelle et % masse grasse); les tests physiques (sprints sur 5m, 10m et 30m), five-jump-test (5J) et YO-YO tests (YYIER1 et YYIRT1).

La description détaillée du protocole se trouve dans la partie consacrée à la méthodologie générale du présent document.

Analyse statistique

Les données sont présentées sous forme de moyenne \pm DS. La distribution normale des données a été vérifiée par le test de Kolmogorov-Smirnov. Afin de comparer les effets de l'entraînement et celles de positions de jeu, une analyse de variance à deux voies avec des mesures répétées a été utilisée. Les analyses post hoc ont été effectuées en utilisant le test de Student-Newman-Keuls. Un alpha de $p \leq 0,05$ a été utilisé pour la signification statistique. Les tailles d'effet (d) de ces différences ont également été déterminées comme décrit par Cohen,(1988). Valeurs de taille d'effet de 0,2, 0,5 et supérieur à 0,8 ont été considérées comme représentant une petite différence, moyenne et grande, respectivement. Selon Bland et Altman (1986), les corrélations intra-classe (CCI) ont également été calculées. Ces analyses ont été réalisées par Sigma Stat 3,10 logiciels (SPSS, Chicago, IL, USA).

I.3. Résultats

♦ Les paramètres anthropométriques

Les paramètres anthropométriques sont présentés dans le tableau 1. La taille augmente significativement ($p < 0.01$). La masse corporelle ne change pas significativement entre T1 et T2. De même, le pourcentage de masse grasse ne change pas significativement au cours de la saison.

Tableau 1. Evolution des caractéristiques anthropométriques des jeunes footballeurs au cours d'une saison. (Moyenne \pm DS)

	T1	T2	Cohen's d	95%ICC
Taille (cm)	176,9 \pm 4, 8	179,9 \pm 4,3**	0,33	0,7/5,7
Masse corporelle(kg)	69,4 \pm 6,4	69,1 \pm 5,9	0,02	-6,6/6,0
% Masse Graisse	12,3 \pm 3,2	12,2 \pm 2,3	0,01	-4,48/4,28

Différences significatives : *: $p < 0.05$; **: $p < 0.001$

♦ Les qualités physiques

Tableau 2. Evolution des qualités physiques des jeunes footballeurs au cours d'une saison. (Moyenne \pm DS)

	T1	T2	Cohen's d	95%ICC
5JT (m)	11,09 \pm 1,22	12,24 \pm 0,67**	0,61	-2,17/4,47
10m (s)	1,90 \pm 0,10	1,83 \pm 0,11**	0,33	-0,19/0,05
30m (s)	4,51 \pm 0,18	4,40 \pm 0,22**	0,28	-0,25/0,03
YYIER (m)	1783 \pm 323	2716 \pm 564**	1,05	93/1773
YYIRT (m)	940 \pm 277	2173 \pm 308**	2,11	446/2554

Différences significatives : *: $p < 0.05$; **: $p < 0.001$

Tous les paramètres des qualités physiques sont présentés dans le tableau 2. La performance au 5JT a augmenté significativement du début (T1) à la fin de la saison (T2) ($p < 0.01$). Idem, les performances en sprint sur 10 et 30m ont été significativement meilleures en T2 qu'en T1 ($p < 0.001$). De plus, les performances en yoyo tests ont augmenté significativement ($p < 0.001$) durant la saison.

♦ **Les paramètres anthropométriques selon le poste de jeu**

Les résultats concernant les paramètres anthropométriques selon le poste de jeu sont présentés dans le tableau 3. A T1 et T2, les GB sont significativement plus grands et plus lourds que les joueurs de champ ($p < 0.05$). Il n'y pas de différences significatives entre les joueurs de champ concernant la taille et la masse corporelle. De même à T2, les GB sont significativement plus grands que les joueurs de champ. Concernant le pourcentage de graisse, il n'y a pas de différence significative entre l'ensemble des joueurs.

♦ **Les paramètres physiques selon le poste de jeu**

Les résultats concernant les paramètres physiques sont présentés dans le tableau 4. La performance au 5JT n'a pas révélée de différence significative selon le poste de jeu entre les sujets à T1 et à T2. De même, aucune différence n'a été observée dans les performances des sprints de 10 et 30m. Concernant les performances au test YO-YO, une différence significative a été observée entre les postes à T1, par contre à T2, les joueurs de champ étaient significativement meilleurs que les GB ($p < 0.01$).

Tableau 3.Caractéristiques anthropométriques des jeunes footballeurs au cours d'une saison, en fonction du poste de jeu. (Moyenne \pm SD)

	Taille (cm)				Masse corporelle (kg)				Graisse(%)			
	T1	T2	Cohen's d	95%ICC	T1	T2	Cohen's d	95%ICC	T1	T2	Cohen's d	95%ICC
GB	183,3 \pm 3,5	185,3 \pm 3,2**	0,30	1,0/3	78,00 \pm 5,0	76,90 \pm 3,3	0,14	1,38/5,78	14,18 \pm 1,5	13,19 \pm 2,4	0,25	-6,65/4,67
DEF C	176,6 \pm 4,4	179,4 \pm 4,2**	0,33	-1,3/6,9	69,80 \pm 4,6	68,6 \pm 4,5	0,13	3,26/4,06	12,45 \pm 3,6	11,56 \pm 2,3	0,15	-5,97/4,19
DEF L	176,2 \pm 2,9	179,9 \pm 3,6**	0,57	1,46/5,94	67,30 \pm 3,8	67,00 \pm 1,9	0,05	-5,16/3,56	12,38 \pm 3,1	10,75 \pm 2,4	0,16	-4,43/1,7
MIL	175,3 \pm 4,2	178,7 \pm 3,7**	0,43	2,0/4,8	64,70 \pm 4,1	65,50 \pm 4,2	0,10	-6,4/4,8	10,55 \pm 3,1	10,09 \pm 1,9	0,09	-4,36/3,24
ATT	173,9 \pm 3,3	177,2 \pm 2,9**	0,53	1,48/5,1	68,30 \pm 6,6	68,4 \pm 7,3	0,01	-6,3/6,5	12,27 \pm 3,5	10,57 \pm 1,9*	0,31	-5,96/2,56

Différences significatives : *: $p < 0.05$; **: $p < 0.001$

GB: Gardien de but; DEF L: Défenseur latérale; DEF C: Défenseur central; MIL: Milieu de terrain; ATT: Attaquant

Tableau 4.Caractéristiques physiques des jeunes footballeurs au cours d'une saison, en fonction du poste de jeu.(Moyenne \pm DS)

	5-JT(m)				30m Vitesse(s)				YYIER (m)				YYIRT (m)			
	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>Cohen's d</i>	<i>95%ICC</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>Cohen'd</i>	<i>95%ICC</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>Cohen's d</i>	<i>95%ICC</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>Cohen's d</i>	<i>95%ICC</i>
GB	11,16 \pm 1,0	12,10 \pm 0,6*	0,59	-0,08/1,96	4,63 \pm 0,2	4,52 \pm 0,2**	0,27	-0,29/0,07	1480 \pm 341	1720 \pm 0**	0,70	-542/1022	650 \pm 420	1840 \pm 311**	1.63	-130/2730
DEF C	10,83 \pm 1,4	12,32 \pm 0,9**	0,65	-0,25/3,23	4,49 \pm 0,3	4,41 \pm 0,2**	0,16	-0,20/0,04	1733 \pm 477	2986 \pm 463**	1.33	1161/1345	896 \pm 131	2112 \pm 303**	2.80	694/1906
DEF L	11,12 \pm 1,4	12,20 \pm 0,7*	0,56	-1,22/3,38	4,49 \pm 0,2	4,37 \pm 0,3**	0,24	-0,40/0,06	1880 \pm 284	2860 \pm 241**	1.87	733/1453	1146 \pm 166	2360 \pm 80**	4.97	520/1760
MIL	11,39 \pm 1,4	12,19 \pm 0,8*	0,37	-0,64/2,44	4,47 \pm 0,2	4,35 \pm 0,3**	0,24	-0,26/0,02	1712 \pm 267	2768 \pm 339**	1.74	610/1122	1133 \pm 23	2346 \pm 244**	4.54	112/3060
ATT	11,05 \pm 0,8	12,34 \pm 0,4**	1,07	-0,15/2,73	4,46 \pm 0,2	4,36 \pm 0,1**	0,33	-0,24/0,04	2040 \pm 134	3106 \pm 220**	3.01	773/1653	1000 \pm 174	2360 \pm 174**	3.90	638/2802

Différences significatives : *: $p < 0.05$; **: $p < 0.001$

GB: Gardien de but; DEF L: Défenseur latérale; DEF C: Défenseur central; MIL: Milieu de terrain; ATT: Attaquant

I.4. Discussion

L'objectif de cette étude était d'étudier l'évolution des paramètres anthropométriques et des qualités physiques chez des jeunes footballeurs élités Tunisiens et d'analyser les différences selon leurs postes de jeu. Cette étude a montré que les paramètres anthropométriques et les performances physiques mesurées ont augmenté significativement au cours de la saison suggérant qu'une saison d'entraînement peut induire un développement anthropométrique significatif et une augmentation des paramètres physiques chez des jeunes footballeurs élités. De plus, cette étude a également montré qu'il est difficile de fournir un profil de référence précis selon la position de jeu pour cette population de jeunes joueurs élités U15.

Concernant les données anthropométriques, nos sujets ont des tailles plus grandes que celles rapportées dans la littérature (Gil et al. 2007b; le Gall et al. 2010; Philippaerts et al. 2006; Vaeyens et al. 2006). Concernant la masse corporelle nos sujets étaient plus lourds que ceux rapportés dans la littérature (Gil et al. 2007b; le Gall et al. 2010; Philippaerts et al. 2006; Vaeyens et al. 2006). Nos résultats concernant le pourcentage de masse grasse sont similaires ou légèrement supérieurs à ceux rapportés par la littérature (Chamari et al. 2004; Gil et al. 2007b).

Comme il a été montré dans des études précédentes chez les jeunes footballeurs (Bland et al. 1986; Gil et al. 2007b), les GB sont significativement plus grands, plus lourds et présentent un pourcentage de graisse plus élevé que les joueurs de champ qui ne présentent aucune différence en terme de taille et masse corporelle mesurées. Toutefois, les attaquants présentent le même pourcentage de graisse que les autres joueurs de champ. Par contre, Gil et al. (2007b) ont rapporté que les ATT ont des masses musculaires plus élevées. Plusieurs études réalisées sur des élités footballeurs adultes sont en accord avec ces résultats (Bangsbo, 1994; Hencken et White, 2006; Sporis et al. 2009).

Ces différences des caractéristiques anthropométriques pourraient être expliquées par des considérations génétiques, sociales, nutritionnelles et culturelles qui peuvent illustrer les différences entre les somatotypes des joueurs de football européens et nord africains (Chaouachi et al. 2005). Cela pourrait être expliqué aussi par un processus de maturité plus précoce. Il est possible que le staff et les entraîneurs aient choisi les joueurs sur la base des caractéristiques anthropométriques afin d'être meilleurs sur le plan physique par rapport aux adversaires et ainsi, utiliser une stratégie basée sur les aspects athlétiques du jeu pour réussir.

Les performances physiques augmentent significativement durant la saison. En effet, la performance au 5JT a été améliorée significativement ($p < 0.001$). Ce test était significativement corrélé au saut vertical et aux variables d'explosivité mesurées durant les tests isocinétiques et validé pour évaluer les adaptations à l'entraînement (Chamari et al. 2008). En football, peu d'études ont utilisé ce test, ce qui explique le manque de valeurs de références pour cette catégorie d'âge. Chamari et al. (2008) ont mesuré chez l'équipe nationale Tunisienne olympique U-23, la performance au 5JT, une performance de $12,99 \pm 0,53$ m a été observée, alors que nos joueurs ont sauté une distance de $12,24 \pm 0,67$ m. La proximité entre ces deux résultats suggère le bon développement de la masse musculaire et l'efficacité du programme d'entraînement chez nos footballeurs élites. Aucune différence n'a été décelée entre les groupes de différents postes de jeu au 5JT. Les performances en sprint de 10 et 30 m ont été améliorées significativement (3,7 et 2,5% respectivement) pendant cette saison. Stolen et al. (2005) ont rapporté que 96% de sprints réalisés durant un match sont moins de 30m. Toutefois, peu d'études sur les jeunes footballeurs ont utilisé le sprint de 30m, en préférant le 40m (Helgerud et al. 2001; Sporis et al. 2009). Nos valeurs sont proches de celles rapportées dans la littérature (Stolen et al. 2005). Chamari et al. (2004) ont rapporté chez les joueurs juniors Tunisiens et Sénégalais une performance légèrement supérieure ($4,88 \pm 0,18$ s) à celle de nos sujets. L'entraînement focalisé sur l'amélioration de la coordination et de la vitesse semble être efficace pour développer la performance en sprint sur des courtes distances (Stolen et al. 2005). Mais, dans notre étude nous n'observons pas de différences significatives concernant le profil anaérobie en fonction des postes de jeu. De plus, les performances des gardiens de but ont été similaires à celles des joueurs de champ. En 2008, Di Salvo et al. ont montré que le profil de l'activité des gardiens de but étaient décisives pendant les matchs, notamment les sprints entre 0 et 5m, cette observation pourrait expliquer, au moins en partie, nos résultats. Cela signifie également que les joueurs de champ ne diffèrent pas dans leurs caractéristiques de sprint alors que l'activité sur le terrain n'est pas la même que ce soit chez les jeunes (Buchheit et al. 2010) ou chez l'adulte (Di Salvo et al. 2007). Il semble que l'entraînement de sprint peut être plus individualisé selon le poste de jeu et les capacités physiques et techniques (Dellal et al. 2010). Wong et al. (2009) ont rapporté que les défenseurs chinois U14 étaient plus rapides sur le 30m. Dans cette étude, les joueurs du milieu (MIL) ont eu la meilleure performance ($4,35 \pm 0,3$ s) sur sprint de 30m par contre les défenseurs ont présenté la plus faible performance ($4,41 \pm 0,02$ s). Ce dernier résultat est en désaccord avec les résultats de Gil et al. (2007b), qui ont observé les meilleures valeurs d'agilité, vitesse et puissance chez les attaquants. Basés sur ces résultats, probablement la

tactique utilisée par des différentes équipes n'est pas la même, notamment pour les attaquants qui semblent être plus lourds plutôt que rapides. La tactique utilisée par l'entraîneur et le staff influence, certainement, le choix des profils anthropométriques et physiques pour occuper la position stratégique (Di Salvo et Pigozzi ,1998 ; Di Salvo et al. 2007; Bradley et al. 2011).

L'endurance spécifique du football évaluée par le YYIER a augmenté significativement durant l'année de l'entraînement. Si les valeurs initiales étaient inférieures à celle de Wong et al. (2009) observées chez des footballeurs élite chinois U14 (1933 ± 787 m), les valeurs finales de nos joueurs étaient largement supérieures (+28,8%). En outre, les valeurs de YYIRT avaient augmentées significativement. Ces augmentations pourraient être expliquées par le faible potentiel physique au début de la saison. En effet, les tests ont été réalisés juste après l'intégration dans la structure et juste après la pause estivale pendant laquelle il y avait une diminution du volume et de l'intensité de l'entraînement et aussi le manque de suivi nutritionnel. Ces résultats montrent les effets nuisibles de la pause d'été sur les qualités physiques. De plus, le gain pourrait être expliqué par le processus biologique du développement impliquant la maturité des fonctions centrales et périphériques comme les fonctions cardiorespiratoire, musculaires, hormonales et enzymatiques (Holloszy et Coyle, 1984) et/ou par l'entraînement réalisé dans cette académie. Etant donné que l'entraînement des jeunes dans les académies est connu pour être important à la fois sur le plan quantitatif et qualitatif pour préparer les joueurs au plus haut niveau de compétition (Williams et Reilly, 2000). Cependant, en l'absence de groupe contrôle, ces résultats pourraient être affectés par le processus de maturation pubertaire. En accord avec Gill et al. (2007a), nous avons observé aussi que les ATT ont la meilleure capacité d'endurance jugée par la performance au YYIER ou au YYIRT malgré leur pourcentage de graisse plus élevé. En revanche, ces résultats contredisent ceux observés par Wong et al. (2009), qui ont rapporté des meilleures valeurs pour les MIL par rapport aux ATT. Ces résultats sont en désaccord avec la littérature scientifique concernant les footballeurs adultes élites (Wisløff et al.1998) où les MIL ont la meilleure capacité d'endurance en parcourant la plus grande distance ainsi que la distance à haute intensité la plus longue pendant le match (Di Salvo et al. 2007). Ces différences pourraient être expliquées par le programme d'entraînement proposé cette année et/ou la différence d'expérience d'entraînement et des matchs entre nos jeunes joueurs et les footballeurs élites adultes.

I.5. Conclusion

En conclusion, nos résultats montrent une augmentation significative des caractéristiques anthropométriques et des paramètres physiques durant une saison d'entraînement des jeunes footballeurs élites. Ces résultats, s'expliquent essentiellement par les effets du processus de l'entraînement physique mais en l'absence de groupe contrôle l'effet de la maturation pubertaire ne peut pas être occulté. Par ailleurs, aucune distinction en fonction de la position de jeu n'a été constatée dans notre étude. Ces résultats s'expliqueraient essentiellement par les caractéristiques d'entraînement proposé durant cette saison (pas assez spécifique et individualisé) qui ne permettent pas de distinguer les joueurs en fonction du poste occupé.

II. ETUDE 2

Effets d'une saison d'entraînement sur les caractéristiques anthropométriques et les qualités physiques chez des jeunes footballeurs élités

Effects of a soccer season on anthropometric characteristics and physical fitness in elite young soccer players

Accepté au Journal of Sport Science (JSS)

II.1. Introduction

Le football est le sport le plus populaire dans le monde, surtout chez les enfants (Malina et al. 2000 et 2004; Reilly et al. 2000). Il comprend des exercices intermittents de hautes intensités incluant des types variés de courses avec des changements de directions, démarrages, arrêts, sauts et tirs (Alfredson et al. 1996). Cette activité demande des qualités physiques bien développées pour être bien jouée (Castagna et al. 2010). Plusieurs facteurs sont impliqués dans l'identification des talents et l'entraînement des jeunes joueurs de football, tels que la technique, la tactique, les qualités physiques et les caractéristiques anthropométriques (Reilly et al. 2000). A cet égard, les entraîneurs sont constamment à la recherche des méthodes adéquates pour identifier et développer des jeunes footballeurs talentueux. Actuellement, la reconnaissance du rôle des académies des jeunes est importante pour le développement des joueurs de football à long terme. Le rôle de ces académies pour les équipes est d'agir comme des centres pour sélectionner et développer les futurs jeunes joueurs de football. L'investissement économique énorme et des ressources humaines pour ce processus exigent des méthodes objectives pour la sélection et le développement des talents (Francisco et al. 2011). Dans la perspective d'une évaluation objective du potentiel des jeunes joueurs de football, les résultats de profile anthropométrique et physique sont intéressants. En effet, le processus de sélection doit être fait aussi tôt que possible et par conséquent il se produit souvent pendant le stade de développement des joueurs en perspective et est affecté par la maturation.

Les études faites sur les jeunes footballeurs ont montré que les joueurs sont plus grands (Gil et al. 2007b) et ont des squelettes plus matures (Malina et al. 2000) en comparaison avec leurs homologues de même âge chronologiques. Ces recherches ont montré

que la taille, le temps en sprint et les techniques d'anticipation sont les variables les plus discriminantes entre les jeunes joueurs dans des différents niveaux de compétitions (Reilly et al. 2000; Malina et al. 2004; McMillan et al. 2005). Idem, une récente étude longitudinale a étudié les changements des paramètres anthropométriques et des qualités physiques pour les jeunes footballeurs régionaux durant une période de deux années de suivi en comparaison avec des sujets contrôles. Les résultats ont montré que les qualités physiques des jeunes joueurs régionaux sont meilleures que le groupe contrôle (Vänttinen et al. 2011).

De plus, les études de l'entraînement ont montré que chez les enfants pré pubères, la capacité physique pourrait être améliorée (Williams et al. 2000; Obert et al. 2001; Baquet et al. 2002). Par contre, peu d'informations sont actuellement disponibles montrant l'effet de l'entraînement sur les caractéristiques anthropométriques et les performances physiques des jeunes footballeurs pubères au sein d'une académie (Le Gall et al. 2010). L'importance de cette étude est de clarifier le rôle de l'entraînement comme une intervention pour affecter positivement les performances anthropométriques et les potentiels physiques chez des jeunes joueurs footballeurs élités.

Par conséquent, L'objectif de cette étude était d'évaluer les caractéristiques anthropométriques et les performances physiques des jeunes footballeurs élités durant une saison d'entraînement de football en comparaison avec des sujets contrôles de même âge qui ne sont pas des footballeurs et ne s'entraînent pas régulièrement à part les cours d'éducation physique au lycée. L'hypothèse de l'étude suppose que l'entraînement en football est un covariable du développement physique et anthropométrique chez des jeunes footballeurs élités.

II.2. Méthodes

Cinquante garçons ont été recrutés pour notre étude 24 jeunes footballeurs élités ((âge $14,5 \pm 0,4$ ans au début de l'étude) qui s'entraînent régulièrement au sein d'une académie de football, et 26 participants non élités (âge $14,3 \pm 0,3$ ans) forment le groupe contrôle. Au début de l'étude les sujets des deux groupes appartenaient au stade Tanner (2-3). Les jeunes joueurs footballeurs et les sujets contrôles sont évalués 2 fois au cours d'une saison d'entraînement, en T0 au début de la période de préparation et après 8 mois (T1) vers la fin de la saison compétitive. L'évaluation comporte les mesures anthropométriques (Taille, Masse corporelle et %MG) ainsi que les tests physiques suivants : Vitesse (5m, 10m et 30m), Squat-

Jump (SqJ) ; contre mouvement Jump (CMJ), five-jump-test (5J) et le YO-YO intermittent recovery test level-1 (YoYo IRTL1).

La description détaillée du protocole existe dans la méthodologie générale de ce document.

II.3. Résultats

Caractéristiques Anthropométriques

Les caractéristiques anthropométriques des sujets sont présentées dans le tableau 1. Des différences significatives ont été trouvées entre le groupe des jeunes joueurs et le groupe contrôle concernant la taille ($p < 0.05$) et la masse corporelle ($p < 0.05$) à T0, mais aucune différence n'a été observée dans le pourcentage de masse grasse (%MG). De plus, les jeunes footballeurs ont montré des différences significatives par rapport au groupe contrôle, en ce qui concerne la taille et la masse corporelle à T1 ($p < 0.05$), ils sont plus grands et plus lourds.

Tableau 1: Caractéristiques anthropométriques des footballeurs et des contrôles déterminés au début de la saison (T0) et après 8 mois (T1). Les données présentées en moyenne \pm DS.

Variables	Contrôles (n=26)			Footballeurs (n=24)			Footballeurs vs Contrôles §		Interaction (Sig.)
	T0	T1	#	T0	T1	#	T0	T1	
Taille (cm)	168 \pm 8,9	169 \pm 7,5	1 ^{n.s}	175,6 \pm 4,5	178,8 \pm 4,1	3,2*	7,6*	9,8*	0,000
Masse corporelle(kg)	52,5 \pm 12,1	53,6 \pm 6,1	1,1 ^{n.s}	70,1 \pm 5,9	67,7 \pm 5,6	2,4 ^{n.s}	17,6*	14,1*	0,000
%MG	14,3 \pm 2,3	12,5 \pm 2,7	-1,8 ^{n.s}	13,3 \pm 2,8	11,8 \pm 2,6	-1,5 ^{n.s}	1 ^{n.s}	0,7 ^{n.s}	0,116

§ : Différences entre footballeurs et contrôles ; #: Différences entre T0 and T1 ; vs: versus
% MG: Pourcentage de masse grasse ; n.s: non significative, *: significative at $p < 0.05$.

♦ Les caractéristiques des aptitudes physiques

Tableau 2: Mesure des aptitudes physiques des footballeurs et des contrôles déterminés au début de la saison (T0) et après 8 mois (T1). Les données présentées en moyenne \pm DS.

Variables	Contrôles (n=26)			Footballeurs (n=24)			Footballeurs vs Contrôles §		Interaction (Sig.)
	T0	T1	#	T0	T1	#	T0	T1	
CMJ	25,9 \pm 5,1	26,1 \pm 4,1	0,2 ^{n.s}	31,2 \pm 4,1	34,5 \pm 4,4	3,3*	5,3*	8,4*	0,019
SqJ	25,1 \pm 4,8	27,3 \pm 3,6	2,2 ^{n.s}	29,1 \pm 3,6	32,3 \pm 3,7	2,4 ^{n.s}	4,0*	5,0*	0,005
5JT	8,6 \pm 1,2	9,6 \pm 0,6	1,0 ^{n.s}	10,3 \pm 0,7	11,9 \pm 0,5	1,6*	1,7*	2,3*	0,000
Vitesse 5	1,3 \pm 0,1	1,3 \pm 0,5	0,0 ^{n.s}	1,2 \pm 0,1	1,2 \pm 0,1	-0,0 ^{n.s}	-0,1 ^{n.s}	-0,1 ^{n.s}	0,420
Vitesse 10	2,1 \pm 0,2	2,2 \pm 0,6	0,1 ^{n.s}	2,0 \pm 0,1	1,9 \pm 0,1	-0,1*	-0,1*	-0,3*	0,210
Vitesse 30	5,3 \pm 0,3	5,2 \pm 0,1	-0,1 ^{n.s}	4,6 \pm 0,2	4,5 \pm 0,2	-0,1*	-0,7*	-0,7*	0,003
VO2max	46,1 \pm 1,4	47,2 \pm 2,7	1,1 ^{n.s}	47,9 \pm 1,9	55,7 \pm 2,2	7,8*	1,8*	8,5*	0,000

CMJ: countermovement jump (cm); SqJ: squat jump (cm); 5J: 5 jump test (m); T5: temps en 5m (s); T10: temps en 10m (s); T30: temps en 30m (s); (VO_{2max}): consommation maximale d'oxygène (ml/min/kg) ; §: Différences entre footballeurs versus contrôles ; #: Différences entre T0 and T1 ; vs.: versus ; n.s: non significative, *: significative $p < 0.05$.

Comme il a été montré dans le (tableau 2), en comparaison avec le groupe contrôle à T0, les jeunes footballeurs ont atteint des meilleurs résultats dans les tests physiques (contre mouvement jump, squat jump et five jump test ($p<0.05$), et la VO_{2max} estimée ($p<0.05$), à l'exception de la vitesse en sprint (T5m). De même, les mêmes différences ont été observées entre les deux groupes à T1, à l'exception de la vitesse de sprint (T5m). Sauf au squat jump test et la vitesse de sprint (T5m), les jeunes footballeurs ont des différences significatives dans les paramètres physiques entre T0 et T1 ($p<0.05$). Cependant, le groupe contrôle ne présente aucune différence significative dans tous les paramètres des qualités physiques.

♦ **Corrélations entre les différents paramètres**

Tableau 3: Corrélations entre les caractéristiques anthropométriques et les performances physiques des footballeurs et des contrôles

Variables	Footballeurs (n = 24)		Contrôles (n = 26)
	performances physiques	(r)	(r)
Masse corporelle(kg)	5 J (m)	0,04	0,2
	CMJ (cm)	0,2	0,2
	SqJ (cm)	0,3*	0,04
	T 30m (s)	- 0,04	- 0,2
	T 10m (s)	- 0,1	- 0,2
	YYIRTL1	0,3**	0,2
Taille (cm)	5 J (m)	0,4**	0,2
	CMJ (cm)	0,3*	0,1
	SqJ (cm)	0,3**	0,2
	T 30m (s)	- 0,4**	- 0,2
	T 10m (s)	- 0,1	- 0,1
	YYIRTL1	0,1	0,1

5J: 5 jump test (m); **CMJ:** countermovement jump (cm); **SqJ:** squat jump (cm); **T30:** temps 30m (s); **T10:** temps 10m (s); **(YYIRTL1);** YO-YO intermittent recovery test (level-1); - * $p<0.05$; ** $p<0.01$.

Le tableau 3 montre que la masse corporelle est significativement corrélée avec le squat-jump ($r = 0,3$, $p<0.05$) et la distance au YoYo-IRTL1 ($r = 0,30$, $p<0.01$). La taille est significativement corrélée avec le five-jump-test ($r = 0,4$, $p<0.01$), contre-mouvement-jump ($r = 0,3$, $p<0.05$), squat-jump ($r = 0,3$, $p<0.01$) et la performance en sprint de 30m ($r = -0,4$, $p<0.01$). Par contre, aucune différence significative n'a été trouvée entre les paramètres anthropométriques et la performance physique chez le groupe contrôle.

Tableau 4: Corrélations entre les performances physiques (5J, CMJ, SqJ) et le YYIRTl1 pour les footballeurs et les contrôles.

Variables	YYIRTl1	
	Footballeurs(n = 24)	Contrôles(n = 26)
T (0)	(r)	(r)
<i>CMJ(cm)</i>	0,2 *	0,2
<i>SqJ(cm)</i>	0,2 *	0,1
<i>5J(m)</i>	0,6 *	0,2
T (1)		
<i>CMJ (cm)</i>	0,3 *	0,3
<i>SqJ(cm)</i>	0,3 *	0,1
<i>5J(m)</i>	0,5 *	0,2

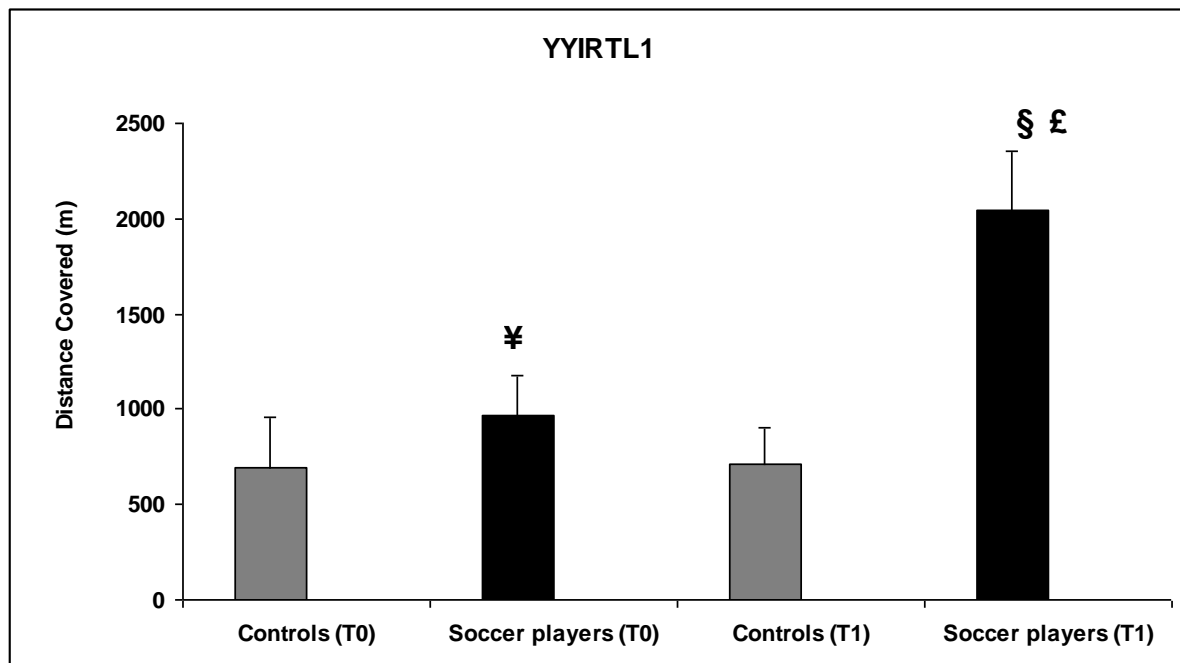
CMJ, countermovement jump (cm); **SqJ**, squat jump (cm); **5J**, 5 jump; (**YYIRTl1**); YO-YO intermittent recovery test (level-1); *, $p < 0.05$.

L'analyse de régression a montré des corrélations significatives entre le contre mouvement jump, le squat jump et five jump test et le YoYo-IRTl1 pour les jeunes footballeurs par rapport aux sujets contrôles tout au long de T0 et T1.

La hauteur des sauts, qui est une qualité physique spécifique dans le football, a principalement montré la plus grande corrélation avec le YoYo-IRTl1 ($r = 0.6$, $p < 0.05$) à T0 pour les footballeurs par rapport au groupe contrôle. Par contre, aucune relation significative n'a été observée entre ses paramètres physiques et le groupe contrôle (Tableau 4)

Finalement, la distance totale parcourue en YoYo-IRTl1 est augmentée significativement de T0 à T1 chez le groupe footballeurs par rapport au groupe contrôle ($p < 0.05$) (Figure 1).

Figure 1: Distance parcourue en **YYIRTL1** pour les footballeurs et les contrôles au début de la saison (T0) et après 8 mois (T1).



¥: Différences significatives en T0 entre les footballeurs et les contrôles, $p < 0.05$.

§: Différences significatives entre T0 et T1 pour les footballeurs seulement, $p < 0.05$.

£: Différences significatives en T1 entre les footballeurs et les contrôles, $p < 0.05$

Légende: (YYIRTL1); YO-YO intermittent recovery test (level-1); (m); Distance parcourue en metre.

II.4. Discussion

Dans cette étude, les profils des paramètres physiques et anthropométriques chez des footballeurs élités pubères, ont été comparés à ceux d'un groupe contrôle. Une meilleure performance a été démontrée au niveau des mesures anthropométriques et tests physiques entre deux points de temps (T0 et T1) chez les jeunes footballeurs par rapport aux sujets contrôles au cours d'une saison d'entraînement dans une académie de football. De plus, nos résultats ont montré des changements dans les paramètres anthropométriques et les qualités physiques durant une saison d'entraînement chez des jeunes footballeurs élités pubères.

Pour la taille, une augmentation significative a été observée pour les jeunes footballeurs mais pas chez le groupe contrôle de T0 à T1. Nos résultats soutiennent l'idée que

le sport a des effets bénéfiques sur la croissance (Cacciari et al. 1990; Juricskay et Mezey, 1994; Nikolaidis et Karydis, 2011) et sont en accord avec des études précédentes qui ont rapporté que des jeunes footballeurs étaient plus grands (Gil et al. 2007a) et ont un squelette plus mature (Malina et al. 2000) par rapport à leurs homologues d'âge chronologiques (Nebigh et al. 2009). Nos résultats sont en accord avec ceux de Carling et ses collègues (Carling et al. 2009) qui ont observé une différence significative concernant la stature des élites, moins de 14 ans (U-14), dans une académie de jeunes footballeurs.

Dans cette recherche, une différence importante a été, aussi, observée dans la masse corporelle entre les jeunes joueurs et les sujets contrôles à T0 et T1. Dans le groupe de footballeurs, la masse corporelle diminue significativement de T0 à T1, alors qu'il n'y pas de changement significatif observé chez le groupe contrôle. Le programme d'entraînement peut expliquer principalement cette diminution de masse corporelle au cours de la période comprise entre T0 et T1 pour les footballeurs élites au sein de l'académie des jeunes (Vicente-Rodriguez et al. 2003). L'élévation de la masse corporelle chez les jeunes footballeurs à T0 est peut être expliquée, au moins en partie, par une longue période de pause après laquelle les premières mesures ont été réalisées au mois d'octobre. Les joueurs pubères ont été probablement en "surpoids" à cause de l'absence de restriction de l'alimentation et le manque d'entraînement. Ainsi, après le début de la saison, les footballeurs ont perdu leur excès de masse corporelle. Nos résultats supportent l'idée que les jeunes footballeurs sont plus lourds que les sujets contrôles qui n'ont jamais été engagés dans une activité physique régulière (Baxter et al. 1993). Nos résultats sont supérieurs à ceux collectés par DA Silva et ses collègues (DA Silva et al. 2008) dans leur récente revue sur les joueurs de football Brésiliens alors que la masse corporelle était similaire. Ces divergences peuvent être expliquées par des différences dans l'identification de talent et le développement des jeunes footballeurs entre les Brésiliens et les Tunisiens.

Cependant, les valeurs anthropométriques dans cette étude ont été similaires à celles rapportées par Le Gall et ses collègues (Le Gall et al. 2010), quand ils ont étudié le profil anthropométrique et les évaluations des qualités physiques chez les joueurs Français élites et qui ont réussi à atteindre le niveau international en comparaison avec les joueurs qui sont restés amateurs. Nos résultats sont aussi en accord avec des données des études transversales et longitudinales, qui ont signalé que les jeunes footballeurs ont une moindre masse corporelle, et une taille plus grande par rapport à leurs homologues d'âge chronologique (Reilly et al. 2000; Gil et al. 2007).

Dante cette étude, des améliorations significatives dans les tests physiques ont été observées chez les jeunes footballeurs élites par rapport au groupe contrôle durant une période de 8 mois d'étude. Le type d'entraînement durant cette année dans cette académie de jeunes où les sujets réalisent chaque semaine un programme de musculation et de conditionnement physique peut expliquer ces augmentations.

Dans notre étude, Les joueurs de football ont de meilleures performances dans les évaluations physiques par rapport au groupe contrôle. Ces joueurs ont des performances significativement supérieures en contre mouvement jump, squat jump et five jump tests, et la prédiction de VO_{2max} et ils étaient plus rapide au sprint sur 10m et 30m, par rapport aux sujets contrôles. Par conséquent, ces différences significatives de la performance physique peuvent être favorisées par un entraînement intense et une compétition régulière chez les jeunes footballeurs élites.

Le contre mouvement jump, le squat jump et le five jump test sont des tests fiables pour évaluer la capacité à réaliser une puissance musculaire aux membres inférieurs, qui est d'une grande importance pour le footballeur (Chamari et al. 2008). En ce qui concerne la puissance musculaire, nos données sont en accord avec d'autres études qui ont mentionné des performances significativement supérieures au saut vertical chez des jeunes footballeurs (Malina et al. 2004; Wong et al. 2009). Par conséquent, nos résultats sont en accord avec plusieurs études qui ont montré que le five jump test peut être un test efficace pour évaluer l'explosivité des membres inférieurs chez les athlètes sélectionnés et les footballeurs masculins d'élites (Spurrs et al. 2003; Slattery, 2004; Chtara et al. 2005; Chamari et al. 2008).

Dans cette étude, les jeunes footballeurs ont été plus rapides dans les 10m et 30m de sprint en comparaison avec le groupe contrôle après un entraînement de football de 8 mois. Ces résultats peuvent, au moins en partie, être expliqués en se référant aux caractéristiques anthropométriques. En effet, Wong et ses collègues ont démontré que la taille corporelle a été significativement corrélée avec les temps des 10m et 30m de sprint et la masse corporelle était significativement corrélée avec le temps de 30m de sprint (Wong et al. 2009).

Ces performances sont inférieures à celles trouvées dans la littérature en fonction de la performance en sprint sur 10m chez les jeunes footballeurs (Le Gall et al. 2002; Chamari et al. 2004) mais elles sont meilleures que ceux de Mc Millan et al. (2005). Les performances sur

30m sont inférieures à celles trouvées par Chamari et al. (2004) chez les jeunes footballeurs qui se sont entraînés dans les mêmes conditions que nos footballeurs.

Cela peut être expliqué par le fait que le programme recommandé par l'Association Tunisienne de Football pour les jeunes footballeurs d'élites dans l'académie des jeunes, était concentré sur un entraînement technique et aérobie durant la première année. C'était la période expérimentale de cette étude. Néanmoins, au cours de la deuxième année, en plus de développer les compétences techniques et le potentiel aérobie le programme d'entraînement sera basé aussi sur le développement de la force et l'entraînement en sprint.

Un des principaux résultats de cette étude était la différence dans la consommation maximale d'oxygène estimée (VO_{2max}) et la distance totale parcourue en YO-YO IRTL1 entre les footballeurs et le groupe contrôle à T0 et T1. La valeur de VO_{2max} estimée à T1 pour les joueurs de football était similaire à celle rapportée dans certaines études (Le Gall, 2002; DA Silva et al. 2008; Wong et al.2009), mais meilleure que celle rapportée par Marcovic et al. (2011) chez les jeunes footballeurs. Nos résultats ont montré une augmentation significative de la VO_{2max} estimée et la distance totale parcourue en YO-YO IRTL 1 après 8 mois d'entraînement de football. Cela peut être expliqué par le niveau initial de nos footballeurs qui a été inférieur en raison de la réduction de l'entraînement après la fin de la saison. L'intensité de l'entraînement que ces athlètes ont subi pendant la période d'entraînement avait un effet bénéfique sur l'amélioration de la puissance aérobie, conduisant à un effet positif.

Ces résultats sont similaires à ceux de Vääntinen et al. (2011) qui ont rapporté dans une récente étude longitudinale que les qualités physiques des footballeurs régionales étaient meilleures que les groupes contrôles dans tous les catégories d'âge, spécialement dans l'endurance cardiovasculaire et l'agilité pendant une période de deux années de suivi. Notre étude illustre les corrélations entre les caractéristiques anthropométriques et les qualités physiques. La relation a été plus accentuée chez les joueurs de football que le groupe contrôle. Les résultats montrent que chez les jeunes footballeurs, la masse corporelle était significativement liée à la performance en squat jump et à la distance parcourue en YO-YO IRTL1, alors que les joueurs les plus grands ont une meilleure performance en five jump test, contre mouvement jump, squat jump et sprint de 30m. Malina et al. (2000) ont, également, suggéré, dans leur étude, que la masse corporelle est le facteur prédictif le plus significatif de course de 30 m et la taille est le facteur prédictif le plus significatif de la performance en saut vertical chez les jeunes footballeurs Portugais âgés de 11 à 16 ans.

Les sauts sont des qualités physiques spécifiques chez le footballeur. Ils ont montré une meilleure relation avec le YO-YO IRTL1 à T0 et T1, pour les footballeurs par rapport au groupe contrôle.

Dans ce sens, une étude précédente a montré une corrélation significative entre le contre mouvement jump et la performance en YO-YO IRTL1, qui préconise que la puissance maximale pliométrique influence la performance en YO-YO IRTL1 chez les jeunes footballeurs (Castagna et al. 2006). Ainsi, il est possible que le gain en puissance puisse expliquer, au moins en partie, le gain en performance en YO-YO IRTL1.

II.5.Conclusion

En conclusion, L'entraînement régulier de football engendre une amélioration des paramètres anthropométriques et des performances physiques des jeunes footballeurs élites en comparaison avec leurs homologues de même âge biologique. Pendant cette période pubère, l'amélioration a été observée dans le groupe de footballeur et aussi entre les footballeurs et les sujets contrôles. Pendant un suivi longitudinal, d'une période d'une saison de football, le programme d'entraînement peut expliquer les meilleures performances observées chez les jeunes footballeurs d'élite en comparaison avec le groupe contrôle.

III. ETUDE 3

Les changements physiques et hormonaux au cours d'entraînement intense chez des jeunes athlètes

Physical and hormonal changes with intense exercise training in young athletes

Article soumis à Medicine and Science in Sports and Exercise (MSSE) (Décembre 2012)

III.1. Introduction

Il est actuellement bien admis que l'activité physique joue un rôle important dans le développement et la croissance des enfants et des adolescents (Roemmich et al. 2001 ; Mackelvie et al. 2002). Néanmoins, les mécanismes expliquant la manière dont l'entraînement physique intense pourrait affecter l'anabolisme du tissu séparément de la croissance normale ne sont pas complètement bien élucidés. L'efficacité de l'entraînement physique sur la performance et l'adaptation physique dépend de la charge d'entraînement et de la capacité de l'individu à s'adapter à cet entraînement. Trop peu d'entraînement ou un excès de celui-ci auront un impact négatif sur la performance souhaitée. Par conséquent, trouver des mesures objectives pour quantifier l'équilibre entre la charge d'entraînement et la tolérance de l'athlète semble être impératif (Nemet et Eliakim, 2010).

L'entraînement intensif en sport ainsi que les compétitions sont souvent associés à des déficits endocriniens chez les hommes adultes (Tanskanen et al. 2011). Chez les jeunes athlètes, le stress de l'entraînement physique intense, combiné à la restriction calorique, peuvent altérer l'homéostasie cellulaire et le développement normal pubertaire (Roemmich et al. 2001 ; Adiyaman et al. 2004). Le préjudice à long terme ou le bénéfice d'un entraînement intense chez les adolescents n'est pas bien connu (Roemmich et al. 2001). La gymnastique est l'un des sports les plus étudiés en ce qui concerne les effets de l'entraînement intensif sur le développement et la croissance (Adiyaman et al. 2004 ; Bricout, 2003 ; Georgopoulos et al. 2010). Il a été montré que la grande charge d'entraînement de ces jeunes athlètes, combiné à un apport calorique restreint, ont été associée à une plus petite taille par rapport à d'autres disciplines sportives (Leone et al. 1998). L'impact de l'exercice intense sur le développement pubertaire des enfants et des adolescents sportifs dans d'autres sports n'est pas encore bien étudié.

La croissance normale chez les enfants et les adolescents est réglée en grande partie par l'axe GH / IGF-I (l'hormone de croissance / Insulin-like Growth Factor-I) (Adiyaman et al. 2004). L'exercice physique joue un rôle important dans la régulation de cet axe en augmentant la sécrétion de GH (Kanaley et al. 1997 ; Kraemer et Ratamess, 2005). Les données de la littérature concernant la réponse de la GH à l'entraînement physique sont divergentes. Weltman et al. (1997) ont observé une réponse émoussée de GH à l'exercice aigu après 3 et 6 semaines d'entraînement intensif, chez les hommes adultes. Toutefois, chez des hommes d'âges moyens et des jeunes cyclistes de compétition, Zaccaria et al. (1999) n'ont pas trouvé de diminution de la réponse de GH après 4 mois d'entraînement d'endurance intense.

Deuschle et al. (1998) ont montré que l'entraînement en endurance intense chez les marathoniens âgés de sexe masculin, par rapport aux témoins sédentaires, n'a pas empêché le déclin de GH, d'IGF-1 et de l'Insuline-Like Growth Factor Binding Protein-3 (IGFBP-3). Chez les femmes non entraînées aucun changement d'amplitude dans l'impulsion de GH au repos lors de l'entraînement en dessous du seuil lactique n'a été observé (Weltman et al. 1992). Inversement, lorsque ces femmes s'entraînent au-dessus du seuil lactique 2, leurs amplitudes d'impulsions de repos de GH augmentent. De plus, chez des athlètes surentraînés, la production endogène de GH est supprimée, la tolérance à l'effort est réduite et la performance est diminuée (Schmikli et al. 2012). Par conséquent, la réponse de GH à l'exercice est complexe et semble être affectée par de nombreuses variables telles que le type, l'intensité et la durée de l'exercice ainsi que par l'âge.

Les effets de l'entraînement physique sur l'IGF-1 sont divergents. Certaines études ont révélé que l'entraînement en endurance augmente les taux circulants d'IGF-1 (Maimoun et al. 2004), alors que d'autres auteurs rapportent une diminution (Eliakim et al. 1998). Par ailleurs, l'exercice aigu et l'entraînement physique permettent l'augmentation de l'IGFBP-3 (Di Luigi et al. 2001). Les résultats divergents concernant la GH, l'IGF-1 et l'IGFBP-3 peuvent être expliqués par des différences dans le type d'exercice, son intensité ou encore sa durée ainsi que par le niveau d'entraînement du sujet, son statut alimentaire, sa composition corporelle et son âge.

Le football est le sport le plus populaire dans le monde, surtout chez les enfants et les adolescents (Cacciari et al. 1990). Optimiser le potentiel physique des jeunes footballeurs, est l'un des principaux objectifs des académies du football pour les jeunes joueurs. En effet, les

jeunes footballeurs élités doivent être prêts à réaliser et de maintenir des charges élevées d'entraînement observées dans le haut niveau. Les variables les plus importantes pour la mesure de la performance dans le football sont la condition physique, la technique et la performance tactique (Rösch et al. 2000). Les qualités physiques des joueurs de football sont généralement mesurées en termes d'endurance, de vitesse, de puissance et de force (Hoff, 2005). Il est relativement facile de tester la condition physique des jeunes joueurs, mais la tâche la plus difficile, c'est de faire la différence entre les adaptations de l'entraînement de football et de la croissance induite par le développement (Vänttinen et al. 2011).

Certaines études ont montré que la pratique footballistique affecte positivement les adaptations hormonales (Hansen et al. 1999; Mejri et al. 2005; Vänttinen et al. 2011). Cependant, les effets à long terme de l'entraînement de football intense sur les adaptations de l'axe GH / IGF-I sont très rares. À notre connaissance, une seule étude a examiné les effets de l'entraînement de football intense pendant une saison de compétition sur les hormones liées à la croissance. En effet, Mejri et al. (2005) ont observé, chez des joueurs footballeurs adultes (19 ans), que l'entraînement en football diminue les niveaux de GH pendant toute la saison de compétition, mais n'a pas eu d'effet sur les niveaux de base d'IGF-1 et IGFBP-3 (Mejri et al. 2005). Toutefois, dans cette étude le groupe expérimental se trouvait à la fin de la période de croissance en plus, le manque d'un groupe témoin ne permettait pas de différencier les effets de l'entraînement de football de ceux relatifs à la croissance normale (Bouix et al. 1997).

À notre connaissance, aucune étude longitudinale (plus de 1 an) n'a étudié l'impact de l'entraînement physique intense chez des élités footballeurs adolescents sur les marqueurs de la croissance et du développement en relation avec l'anthropométrie et les performances physiques. Par conséquent, le but de cette étude est d'étudier les réponses des hormones impliquées dans la croissance (GH, IGF-1 et IGFBP-3) chez des jeunes joueurs footballeurs élités appartenant à l'équipe nationale tunisienne U17 et des contrôles non-sportifs sur une période de 2 ans.

III.2. Méthode

Quarante garçons ont été recrutés pour notre étude, 20 jeunes footballeurs élités (âge $14,5 \pm 0,4$ ans au début de l'étude) qui s'entraînent régulièrement au sein d'une académie de football, et 20 participants non élités (âge $14,3 \pm 0,3$ ans) forment le groupe contrôle. Au début de l'étude les sujets des deux groupes appartenaient au stade de Tanner (2-3) et ils atteignaient les stades 4 et 5 après deux saisons de suivi. Les jeunes joueurs footballeurs et les

sujets contrôles ont été évalués 5 fois en(T0, T1, T2, T3, et T4) au cours des deux saisonssportives.L'évaluation comportait des mesures anthropométriques (Taille, Masse corporelle et % masse grasse) ; des tests physiques, des sprints sur 5m, 10m et 30m, des sauts verticaux et horizontaux (squat-Jump (SqJ) ; contre mouvement Jump (CMJ) et five-jump-test (5J)) ainsi que le YO-YO intermittent recovery test level-1 (YoYo IRTL1). Les concentrations sériques basales de l'hormone de croissance (GH), d'IGF-1 et d'IGFBP-3 ont été mesuréeslors des mêmes périodes que les tests physiques (T0, T1, T2, T3, et T4).

La description détaillée du protocole se trouve dans la partie consacrée à la méthodologie générale du présent document.

III.3. Résultats

♦ Caractéristiques anthropométriques

Les données anthropométriques des joueurs de football et le groupe contrôle sont présentées dans le tableau 1. Des différences significatives ont été observées en ce qui concerne la taille, la masse corporelle et le pourcentage de masse grasse des footballeurs par rapport au groupe contrôle lors des différentes périodes de T0 à T4 ($p < 0.001$).

Tableau 1. Les caractéristiques anthropométriques des footballeurs et des contrôles déterminées sur deux saisons de suivi (moyenne \pm DS)

Mesures	Footballeurs (n = 20)	Contrôles (n = 20)	Valeur: P	Différence entre groupes
Masse corporelle (kg)				
T0	69,0 \pm 5,7	52,7 \pm 12,4	0,001	16,3**
T1	66,6 \pm 5,5	53,4 \pm 12,6	0,001	13,2**
T2	67,9 \pm 5,3	54,55 \pm 12,1	0,001	13,3**
T3	68,7 \pm 5,4	56,6 \pm 12,3	0,001	12,1**
T4	70,0 \pm 5,3	57,8 \pm 11,9	0,001	12,1**
Taille (cm)				
T0	174,5 \pm 3,5	167,7 \pm 8,8	0,01	6,7*
T1	176,0 \pm 3,4	168,2 \pm 8,9	0,01	7,7*
T2	178,2 \pm 3,1	170,1 \pm 8,9	0,001	8,0**
T3	181,0 \pm 3,4	171,8 \pm 8,8	0,001	9,2**
T4	184,2 \pm 3,8	173,2 \pm 9,2	0,001	10,9**
Pourcentage G (%G)				
T0	12,8 \pm 3,0	17,9 \pm 2,9	0,01	-5,1*
T1	12,2 \pm 2,9	16,6 \pm 2,6	0,01	-4,4*
T2	11,4 \pm 2,6	16,6 \pm 2,2	0,01	-5,1*
T3	10,8 \pm 1,4	16,7 \pm 2,2	0,001	-5,9**
T4	10,1 \pm 1,0	16,3 \pm 2,4	0,001	-6,2**

* : Différences significatives entre les footballeurs et les contrôles, * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$

Le tableau 2, montre des changements des paramètres anthropométriques (taille, masse corporelle et le pourcentage de masse grasse) pour les jeunes joueurs de football et les sujets contrôles à travers les différentes périodes de T0 à T1 (première période de suivi): T1-T2 (seconde période de suivi): T2-T3 (troisième période de suivi): T3-T4 (quatrième période de suivi): T0-T4 (période finale de suivi).

Tableau 2. Changements dans les caractéristiques anthropométriques des footballeurs et des contrôles à travers deux saisons de suivi (moyenne \pm DS).

Mesures	Footballeurs (n = 20)	Contrôles (n = 20)
Masse corporelle (kg)	Δ	Δ
T0-T1	-2,4*	0,7
T1-T2	1,2*	1,1*
T2-T3	0,8*	2,0*
T3-T4	1,2*	1,2*
T0-T4	0,9*	5,1**
Taille (cm)	Δ	Δ
T0-T1	1,4*	0,4*
T1-T2	2,2*	1,8*
T2-T3	2,8**	1,7*
T3-T4	3,2**	1,4*
T0-T4	8,7**	5,4**
Pourcentage de G (%G)	Δ	Δ
T0-T1	-0,5	-1,3
T1-T2	-0,7	0,0
T2-T3	-0,5	0,1
T3-T4	-0,7	0,4
T0-T4	-2,6*	1,5

Différences significatives entre les périodes pour les footballeurs et les contrôles, * $p < 0.01$;

** $p < 0.001$

A partir de ces résultats, on observe pour les jeunes footballeurs, des variations (Δ) statistiquement significatives dans la taille et la masse corporelle ($p < 0.01$). Toutefois, pour le pourcentage de masse grasse, on trouve une différence significative, seulement, dans la période totale de T0-T4. Pour les sujets contrôles, des différences significatives (Δ) sont observées dans différentes périodes de suivi pour la taille et la masse corporelle, à l'exception de la première période de suivi: T0-T1.

Pour les jeunes footballeurs, le pourcentage de masse grasse diminue significativement notamment pendant la période totale (T0-T4) ($p < 0.01$), par contre, pour les sujets contrôles, aucune évolution significative n'a été observée lors des différentes périodes de suivi.

♦ Qualités physiques

L'évolution des paramètres physiques (CMJ, SqJ, 5J, 30m Sprint, YYIRT (m) et $VO_2\max$), chez les jeunes footballeurs en comparaison avec le groupe contrôle à travers les différentes périodes, est présentée dans le tableau 3. Les résultats montrent que les différences

(Δ) sont significatives pour les jeunes joueurs par rapport aux sujets contrôles pour CMJ, SqJ, YYIRT, VO_2 max et 5J ($p < 0.01$).

De plus, les performances en sprint de 30m sont statistiquement significatives pour les joueurs de football pendant la période allant de T2 à T3 et la dernière période en comparaison avec le groupe contrôle. Pour ce dernier groupe des différences significatives sont enregistrées pour le CMJ en T1-T2, SqJ en T3-T4, 5J en T0-T1 et T2-T3.

Lors de la période totale (T0-T4), on observe des différences significatives (Δ) chez les deux groupes dans toutes les périodes, mais ces différences sont plus prononcées chez les joueurs de football par rapport aux sujets contrôles (tableau 3).

♦ Réponses hormonales

Le tableau 4 montre que les concentrations hormonales de GH, IGF-1 et IGFBP-3 des joueurs de football sont significativement supérieures que celles des sujets contrôles à travers les différents moments d'évaluation de T0 à T4 ($p < 0.001$).

Tableau 3. Variation des paramètres physiques des footballeurs et des sujets contrôles au cours des deux saisons de suivi (moyennes \pm DS).

Variables	CMJ (cm)		SqJ (cm)		5J (cm)		30m (s)		YYIRT (m)		VO _{2max} (ml/ min/kg)	
Groupes	FB	C	FB	C	FB	C	FB	C	FB	C	FB	C
T0-T1	3,12 **	0,93£	1,80 **	0,25£	1,31 **	0,44*£	-0,03	-0,02	744 **	18£	5,35 **	0,10£
T1-T2	2,22**	1,57*£	1,40*	0,01£	0,36	0,42	-0,03	-0,01	326*	90£	2,30*	0,03£
T2-T3	5,27 **	0,97£	3,43 **	0,72£	0,57*	0,63*	-0,17*	-0,07£	224**	72£	1,11*	0,62£
T3-T4	2,13 **	1,08£	0,39*	0,48*£	1,21**	0,51£	-0,04	-0,05	262 **	8£	1,87 **	0,61£
T0-T4	12,62 **	3,85**£	7,02 **	1,46 **£	2,73 **	1,14**£	-0,27**	-0,15**£	1108 **	188**£	8,40 **	1,36 **£

FB : Footballeurs ; C : Contrôles

: Différences significatives dans les changements entre les points $p < 0.01$, ** $p < 0.001$.

£: Différences significatives dans les changements entre les footballeurs et les contrôles£: $p < 0.01$.

♦ Concentrations hormonales

Le tableau 4 montre que les concentrations hormonales de GH, IGF-1 et IGFBP-3 des joueurs de football sont significativement supérieures à celles des sujets contrôles à travers les différents moments d'évaluation de T0 à T4 ($p < 0.001$).

Tableau 4. Concentrations hormonales (GH, IGF-1 et IGFBP-3) des footballeurs et des contrôles au cours des deux saisons de suivi (moyenne \pm DS).

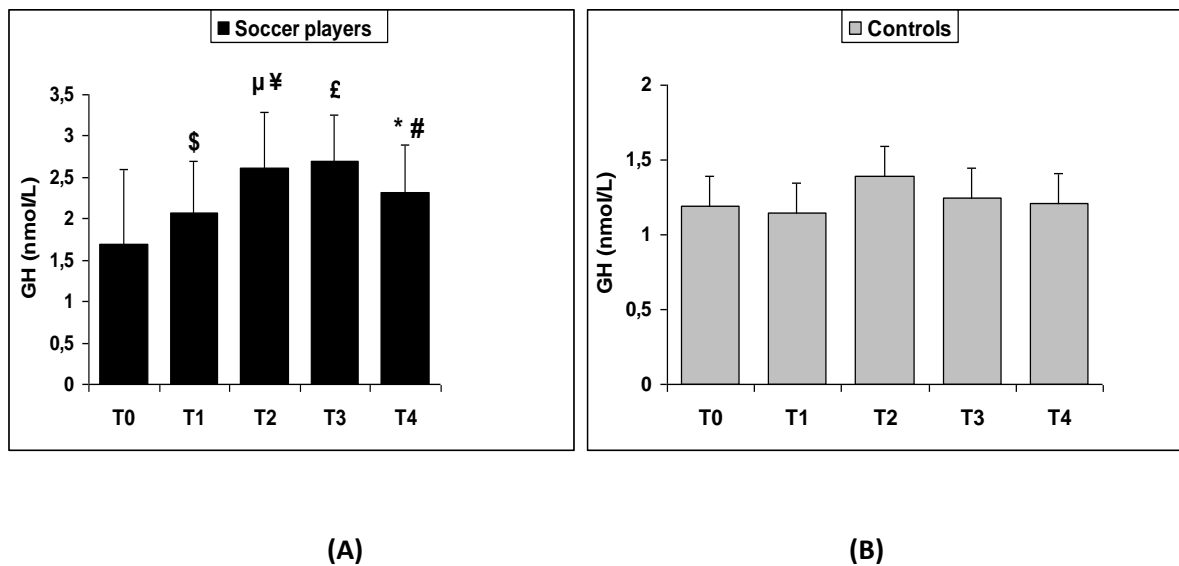
Mesures	Footballeurs (n = 20)	Contrôles (n = 20)	Valeurs P	Différences entre groupes
GH (nmol/L)				
T0	1,69 \pm 0,44	1,19 \pm 0,90	0,01	0,50*
T1	2,07 \pm 0,48	1,15 \pm 0,62	0,01	0,92*
T2	2,62 \pm 0,41	1,39 \pm 0,67	0,001	1,23**
T3	2,70 \pm 0,43	1,25 \pm 0,55	0,001	1,45**
T4	2,02 \pm 0,47	1,05 \pm 0,58	0,01	0,97*
IGF-1 (nmol/L)				
T0	765,35 \pm 62,71	455,95 \pm 71,29	0,001	309,4**
T1	847,95 \pm 38,02	515,70 \pm 61,56	0,001	332,25**
T2	914,20 \pm 34,68	523,75 \pm 58,87	0,001	390,45**
T3	970,60 \pm 34,45	552,90 \pm 80,91	0,001	417,7**
T4	851,65 \pm 43,97	396,55 \pm 95,78	0,001	455,10**
IGFBP-3 (nmol/L)				
T0	45,75 \pm 5,36	38,11 \pm 3,09	0,001	7,64**
T1	49,35 \pm 4,52	41,70 \pm 2,12	0,001	7,65**
T2	51,30 \pm 3,77	42,15 \pm 3,24	0,001	9,15**
T3	55,70 \pm 5,84	43,45 \pm 4,55	0,001	12,25**
T4	57,55 \pm 5,86	42,00 \pm 5,54	0,001	15,55**

* : Différences significatives entre les footballeurs et les contrôles. * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

♦ Evolution de l'hormone de croissance GH

La figure 1 (a et b) montre l'évolution de GH chez le groupe de football et contrôle. Des changements significatifs de GH sont observés chez le groupe des footballeurs durant différentes périodes (T0-T1, T0-T2, T0-T3) ($p < 0.01$). De plus, des différences significatives à travers les périodes de suivi des hormones ont été observées (T1-T2, T3-T4 and T0-T4), $p < 0.01$ (figure 1a). Toutefois, aucun changement n'a été enregistré chez le groupe contrôle, durant toutes ces périodes de suivi (figure 1b).

Figure1 - Variations de GH et différences entre chaque période durant deux saisons de suivi pour les footballeurs (A) et les contrôles (B).

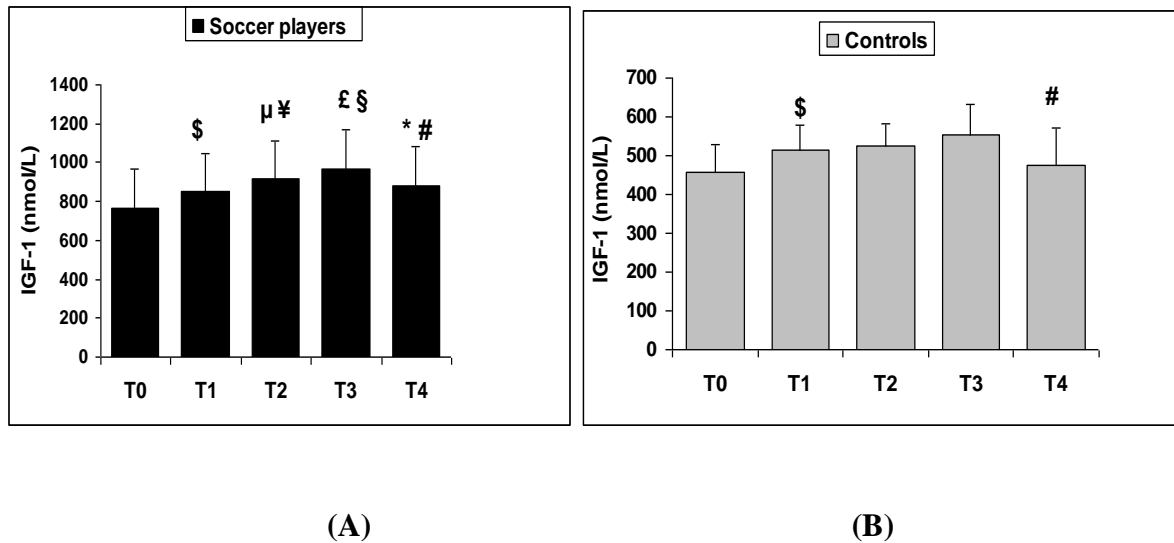


- \$, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T1
- μ, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T2
- £, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T3
- ¥, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T1-T2
- §, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T2-T3
- #, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T3-T4
- *, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T4

♦ Evolution de l'IGF-1

La figure 2 (a et b) illustrent l'évolution d'IGF-1 chez les deux groupes. Des changements significatifs ont été observés pour les joueurs de football pendant les différentes périodes (T0-T1, T0-T2, T0-T3) (p<0.01). Idem que pour la GH, des différences significatives ont été observées à travers toutes les périodes (T1-T2; T2-T3; T3-T4 et T0-T4) (p<0.01) (figure 2a). Pour les sujets contrôles, on détecte uniquement des différences significatives dans l'évolution de l'IGF-I seulement à T0-T1 et pour toute la période (T0-T4) (p<0.05) (figure 2b).

Figure2 - Variations de l'IGF-1 et différences entre chaque période durant deux saisons de suivi pour les footballeurs (A) et les contrôles (B).

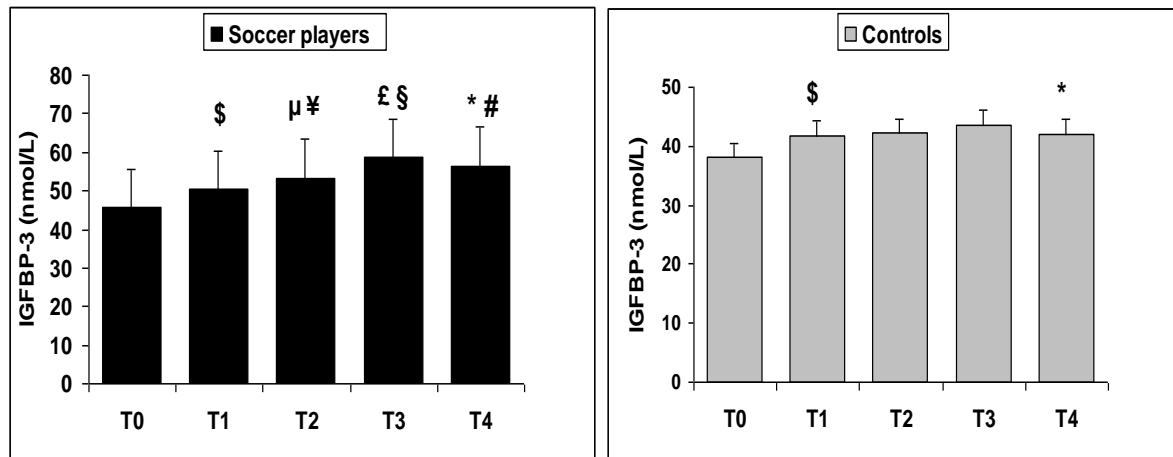


- \$, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T1
- μ, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T2
- £, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T3
- ¥, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T1-T2
- §, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T2-T3
- #, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T3-T4
- *, (p<0.001): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T4

♦ Evolution de l'IGFBP-3

L'évolution d'IGFBP-3 chez les jeunes joueurs et les contrôles est présentée dans la figure 3 (a et b). Pendant les différentes périodes, des changements significatifs ont été enregistrés chez les footballeurs à T0-T1, T0-T2 et T0-T3 ($p<0.01$). De plus, des différences statistiques ($p<0.01$) ont été observées durant toutes les périodes (T1-T2, T2-T3, T3-T4 et T0-T4) (Figure 3a). Pour le groupe contrôle, on observe des différences significatives ($p<0.01$) dans l'évolution de IGFBP-3 uniquement à T0-T1 et la phase finale de l'étude longitudinale (T0-T4), (Figure 3b).

Figure3- Variations de l'IGFBP-3 et différences entre chaque période durant deux saisons de suivi pour les footballeurs (A) et les contrôles (B).



(A)

(B)

- \$, ($p < 0.001$): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T1
- μ , ($p < 0.001$): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T2
- £, ($p < 0.001$): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T3
- ¥, ($p < 0.001$): Variations entre footballeurs et contrôles en T1-T2
- §, ($p < 0.001$): Variations entre footballeurs et contrôles en T2-T3
- #, ($p < 0.001$): Variations entre footballeurs et contrôles en T3-T4
- *, ($p < 0.001$): Variations entre footballeurs et contrôles en T0-T4

♦ Corrélations entre les concentrations hormonales et les paramètres physiques

Le tableau 5 montre que l'IGF-1 est corrélé aux CMJ ($r = 0.49$, $p < 0.05$), SqJ ($r = 0.58$, $p < 0.01$) et 5J ($r = 0.52$, $p < 0.01$) pour les jeunes joueurs à T0. De plus, à T4 les mêmes corrélations sont observées entre l'IGF-1 et les mêmes paramètres physiques (CMJ, SqJ and 5J).

L'analyse de régression a montré des corrélations significatives entre l'IGFBP-3 et le CMJ ($r = 0.45$, $p < 0.05$), SqJ ($r = 0.58$, $p < 0.01$) et 5J ($r = 0.47$, $p < 0.01$) pour les jeunes footballeurs à T0. Les mêmes corrélations ont été enregistrées entre IGFBP-3 et les mêmes paramètres physiques (CMJ, SqJ et 5J) pour les jeunes footballeurs en comparaison avec les sujets contrôles à T4. Ainsi, Il n'y a pas de relation entre l'IGFBP-3 et les paramètres physiques chez le groupe contrôle à T0 et T4. Aucune relation n'a été observée entre la GH et

les performances physiques pour les jeunes footballeurs et les sujets contrôles durant toute la période de suivi.

♦ **Corrélations entre les hormones et la RPE (Rating of Perceived Exertion).**

L'analyse de régression a montré des corrélations significatives entre les concentrations basales d'IGF-1) et la RPE à T2 et T3 ($r = 0.29$, $p < 0.05$), et avec l'IGFBP-3 à T1, T2 et T3 ($r = 0.23$, $p < 0.05$) après 2 saisons d'entraînement de football. Cependant, aucune relation significative n'a été observée entre les valeurs de RPE et la GH pendant les mêmes périodes chez le groupe des footballeurs (Tableau 6).

Tableau 5. Relation entre les paramètres physiques et les concentrations hormonales (GH, IGF-1 et IGFBP-3) chez les footballeurs et les contrôles.

Périodes	T0		T4		T0		T4		T 0		T 4	
Groupes	FB	C	FB	C	FB	C	FB	C	FB	C	FB	C
Variables	GH (ng/ml)				IGF-1 (ng/ml)				IGFBP-3 (ng/ml)			
	(r)		(r)		(r)		(r)		(r)		(r)	
CMJ (cm)	0,07	-0,12	0,24	-0,11	0,49 *	0,01	0,45 *	0,05	0,45*	0,15	0,47*	0,05
SqJ (cm)	0,04	-0,15	0,13	-0,04	0,58 **	0,13	0,57 **	0,24	0,58**	0,04	0,57**	0,03
5J (cm)	0,25	-0,18	0,27	-0,16	0,52 **	0,04	0,47 *	0,05	0,47*	0,27	0,52**	0,11
30m (s)	-0,02	-0,11	-0,11	-0,16	0,02	0,11	0,14	0,19	0,17	0,09	0,21	0,14
YYIRT (m)	-0,36	-0,10	-0,20	-0,16	0, 22	0,04	0,19	0,14	0,36	0,16	0,13	0,12
VO2 max (ml/min/kg)	-0,05	-0,02	-0,19	-0,02	-0,23	0,03	0,13	0,18	0,35	0,14	0,12	0,12

*: Corrélation significative; *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$

Tableau 6.Corrélations entre la valeur de RPE et les concentrations hormonales (GH, IGF-1 et IGFBP-3) chez les footballeurs.

Mesures	Footballeurs	RPE	(r)
<i>GH (nmol/L)</i>			
T1 (16 semaines)	2,07 ± 0,48	7504 ± 3204,15	0,17
T2 (16 semaines)	2,62 ± 0,41	11872 ± 4021,39	0,18
T4 (24 semaines)	2,02 ± 0,47	15240 ± 2436,28	0,15
<i>IGF-1 (nmol/L)</i>			
T1 (16 semaines)	847,95 ± 38,02	7504 ± 3204,15	0,22 ^a
T2 (16 semaines)	914,20 ± 34,68	11872 ± 4021,39	0,29 ^a
T4 (24 semaines)	851,65 ± 43,97	15240 ± 2436,28	0,27 ^a
<i>IGFBP-3 (nmol/L)</i>			
T1 (16 semaines)	49,35 ± 4,52	7504 ± 3204,15	0,19
T2 (16 semaines)	51,30 ± 3,77	11872 ± 4021,39	0,21 ^a
T4 (24 semaines)	57,55 ± 5,86	15240 ± 2436,28	0,23 ^a

a : Corrélation significative; a: $p < 0.05$.

III. 4. Discussion

Dans cette étude, malgré que les joueurs de football sont plus grands et plus lourds que les sujets témoins au début de l'étude, l'ensemble des sujets était bien apparié sur l'âge et le stade de Tanner. Comme prévu, nous avons observé une augmentation significative de la taille chez l'ensemble de nos sujets adolescents au cours de la période de 2 ans. Les joueurs de football élités sont plus grands que les sujets du groupe contrôle à tous les temps. Nos résultats appuient l'idée que le sport en général et l'entraînement de football en particulier, même intense, a des effets bénéfiques sur la croissance (Mackelvie et al. 2002). Nos résultats supportent ceux d'autres études qui ont observé que les jeunes joueurs de football élités sont plus grands (Gil et al. 2007a) et ont un squelette plus mature (Malina et al. 2000) par rapport aux sujets témoins de même âge.

Dans notre étude, une différence importante a également été observée en ce qui concerne la masse corporelle entre les jeunes joueurs et les sujets témoins au cours des deux saisons de suivi à tous les points temporels. Ces résultats sont similaires à ceux relevés par Gil et al. (2007a) chez des joueurs footballeurs élités. Chez nos footballeurs, la masse

corporelle diminue significativement de T0 à T3, ensuite elle augmente légèrement à T4, tandis que pour les témoins, une augmentation significative de masse corporelle a été observée de T0 à T4. Des différences significatives dans le pourcentage de graisse corporelle sont observées entre les deux groupes. Les joueurs de football sont plus maigres que les contrôles tout au long de la période d'étude. Des résultats similaires ont été observés par d'autres auteurs comparant les joueurs footballeurs élites aux joueurs non-élites (Gil et al. 2007a; Gravina et al. 2008). Pour les jeunes footballeurs, le pourcentage de masse grasse diminue de façon significative au cours de la période de l'étude (T0-T4) ($p < 0,01$), mais pour les sujets témoins aucun changement significatif n'a été observé.

♦ **Concentrations hormonales entre chaque point de temps pendant deux saisons de football**

L'exercice physique représente un facteur parmi d'autres, connus pour jouer un rôle important dans la régulation de l'axe GH-IGF-I (Kanaley et al. 1997). La réponse de la GH à l'exercice dépend de la durée et de l'intensité de l'exercice, du niveau de sujets et d'autres facteurs environnementaux tels que la température ambiante (Holt et al. 2001; Wheldon et al. 2006).

Pendant l'adolescence, la GH joue un rôle essentiel dans la régulation des caractéristiques anthropométriques et joue un rôle clé dans la régulation de la composition corporelle. Ainsi, l'entraînement physique, peut modifier les réponses hormonales et les adaptations des fonctions endocriniennes au repos et à l'exercice musculaire répétées, notamment les hormones de l'axe somatotrope (Duclos, 2001). Nos résultats montrent des changements significatifs dans les concentrations plasmatiques de GH chez les jeunes footballeurs pendant les différentes périodes de temps et après deux saisons de suivi, mais aucun changement n'a été observé dans le groupe contrôle. En effet, Eliakim et Nemet, (2010) ont montré que de longues périodes d'entraînement sont associées à une stabilité ou à une augmentation des concentrations de GH et d'IGF-1. Cependant, nos résultats ne sont pas en accord avec ceux rapportés par la seule étude, à notre connaissance, qui a étudié les concentrations plasmatiques de GH au cours d'une saison de football (Mejri et al. 2005). En effet, ces auteurs ont démontré que les niveaux de GH au repos et en réponse à l'exercice étaient plus élevés au début de la saison de football (S1) que dans son milieu (S2) ou à la fin (S3) (Mejri et al. 2005). Ces différences de résultats peuvent s'expliquer, au moins en partie, par différents facteurs connus pour influencer les réponses de GH au repos, comme le niveau

de l'intensité, de la durée de la session de l'entraînement, le niveau des sujets et leur âge chronologique (Kraemer et Ratamess, 2005). En effet, les joueurs de football, impliqués dans l'étude menée par Mejri et al. (2005) étaient des jeunes adultes (19 ± 1 an) et leur charge de travail relative était inférieure à celle de nos jeunes joueurs de football. Il a été suggéré l'existence d'un seuil minimal en ce qui concerne l'intensité d'entraînement pour induire une élévation significative de GH lors d'un processus d'entraînement de longue durée (Manetta et al. 2002). De plus, l'étude de Mejri et al. (2005) ne possédait pas de groupe contrôle, de sorte qu'il est difficile de séparer les variations dues à la croissance de celles liées à l'entraînement.

Des résultats contradictoires ont été rapportés concernant l'effet de l'exercice physique sur les taux sériques d'IGF-I (Eliakim et al. 1998; Walker et al. 2004). Les données de la présente étude illustrent une modification sérique des valeurs basales d'IGF-I pour les joueurs de football et les sujets témoins. Ainsi, les augmentations aiguës dans le sérum total de l'IGF-I ont été identifiées suite à des périodes différentes pour les jeunes footballeurs (T0-T1, T0-T2, T0-T3) ($p < 0,01$). De plus, il y avait des différences significatives entre toutes les périodes pour les jeunes joueurs de football par rapport aux sujets témoins après deux saisons de suivi ($p < 0,01$). Les taux sériques d'IGF-1 augmentent de façon constante avant la puberté, avec un pic au cours de la puberté tardive et il baisse rapidement par la suite (Juul et al. 1995). En conséquence, cette hormone considérée comme un polypeptide, présente dans la circulation systémique est synthétisée par les adolescents tout au long de la puberté (Mackelvie et al. 2002). Dans la présente étude, les sujets contrôle ne présente des différences significatives que lors de la première période (T0-T1) et au cours de la période totale de l'étude (T0-T4) ($p < 0,01$). Les différences observées entre les joueurs de football et les sujets témoins ne sont pas surprenantes, vu que Kraemer et Ratamess, (2005) ont signalé qu'une longue période d'entraînement, est accompagnée par une augmentation des valeurs au repos d'IGF-1. Cependant, les effets de l'exercice physique régulier sur les valeurs d'IGF-1 ne sont pas encore très bien élucidés. Plusieurs études ont montré que l'entraînement en endurance entraîne une augmentation des taux circulants d'IGF-1 chez les jeunes hommes et les femmes (Kanaley et al 1997, Holt et al 2001), tandis que d'autres ont rapporté des résultats différents (Eliakim et al. 1998). Poelman et al. (1994) ont constaté que l'entraînement en endurance augmente le niveau de basal d'IGF-1 chez les adultes âgés. Ces résultats suggèrent que l'âge associé à un déclin des réponses de l'axe somatotrope peut être atténué par l'entraînement en endurance.

Comme pour les résultats de la GH, notre constatation concernant les valeurs de base d'IGF-I ne sont pas en accord avec ceux rapportés par Mejri et al. (2005) et les mêmes éclaircissements peuvent être avancées ici pour expliquer ces différences. Chez les jeunes, des exercices à haute intensité sont accompagnés par une activité accrue du système IGF-I favorisant un état anabolique (Eliakim et al. 1998).

L'IGFBP3 est la principale protéine de liaison de l'IGF-1 dans la circulation humaine. Cette hormone présentée comme une glycoprotéine est synthétisée dans de nombreux tissus, ce n'est pas seulement une protéine de transport, mais possède aussi d'autres actions complexes : elle module à la fois le système endocrinien et l'action paracrine de l'IGF-1, influe sur sa biodisponibilité et peut également exercer des effets IGF-indépendants sur les cellules cibles. Le niveau d'IGFBP3 varie tout au long de notre étude.

♦ **Réponses hormonales et aptitudes physiques**

Des résultats antérieurs ont démontré que les niveaux d'aptitude physique chez les adultes ou les jeunes hommes sont connus pour être corrélés avec les niveaux de concentration d'IGF-I. Les taux sériques d'IGF-1 et d'IGFBP3 sont positivement corrélés avec le niveau de croissance normale chez les enfants et les adolescents et aussi avec la performance aérobie chez les enfants (Brun et al. 1996; Manetta et al. 2002).

Des corrélations significatives entre l'IGF-1 et les aptitudes physiques (CMJ, SQJ et 5J) ont été observées chez nos jeunes footballeurs au début de l'étude et après deux saisons d'entraînement de football. La corrélation existant entre les paramètres physiques et les taux sériques d'IGF-I, confirment que chez les adolescents en bonne santé, l'exercice réalisé à haute intensité est associé à une activité accrue du système IGF favorisant un état anabolique (Eliakim et al. 1998). Par conséquent, Maimoun et al. (2004) ont observé que la biodisponibilité d'IGF-1 jugée sur l'index IGF-1/IGFBP-3 a augmenté au cours de la saison, tandis que les concentrations d'IGFBP3 restaient inchangées après une saison de triathlon.

Comme pour l'IGF-1, les taux sériques d'IGFBP-3 sont également positivement corrélés avec les paramètres physiques (CMJ, SQJ et 5J) chez les jeunes joueurs de football après deux saisons d'entraînement, mais pas chez les sujets témoins. De même, une corrélation significative entre l'IGFBP3 et la $VO_2\text{max}$ a été constatée chez des jeunes sujets

masculins (Brun et al. 1996). Ainsi, l'IGFBP3 peut être considérée comme un très bon marqueur endocrinien de la condition physique (Manetta et al. 2002).

Les données de la littérature concernant l'effet de l'entraînement sur les niveaux de GH sont controversées. Cependant, dans notre étude, aucune association n'a été observée entre les performances physiques des jeunes footballeurs et des contrôles avec la GH tout au long de notre étude. En revanche, Eliakim et al. (1998) ont observé une corrélation positive entre les aptitudes physiques et les niveaux de GH chez des filles adolescentes. L'entraînement augmente non seulement les niveaux de repos de GH, mais également sa réponse à l'exercice (Manetta al. 2002). Ainsi, la réponse de GH à l'entraînement peut être différente en fonction de l'âge des sujets, de l'intensité de l'entraînement et de l'activité physique pratiquée (Kraemer et Ratamess, 2005).

Nos résultats ont montré des corrélations significatives entre les concentrations hormonales d'IGF-1 et d'IGFBP3 avec les valeurs de RPE chez les jeunes footballeurs. Ce résultat est en accord avec la majorité des recherches récentes qui ont utilisé la RPE chez des jeunes sportifs pour estimer et quantifier la charge d'entraînement (Marinoval. 2008, Brink et al. 2010, Mortatti et al. 2012). Pendant l'adolescence, il semble que le suivi de la charge d'entraînement des jeunes joueurs préviendrait le développement du syndrome de surentraînement (Tanskanen et al. 2011). Ainsi, nos résultats confirment que les concentrations d'IGF-1 et d'IGFBP3 peuvent être des outils utiles pour juger de la bonne dose des charges d'entraînement chez les joueurs de football de haut niveau (Brink et al. 2010 ; Mortatti et al. 2012).

III. 5. Conclusion

À notre connaissance, cette étude est la première ayant étudié les hormones somatotropes et les effets de la charge d'entraînement pendant une longue période d'entraînement de football (deux saisons de suivi) avec des jeunes footballeurs élités adolescents faisant partie de l'équipe nationale Tunisienne U17. Cette étude fournit des résultats concernant les caractéristiques anthropométriques, les performances des aptitudes physiques et des concentrations hormonales des jeunes footballeurs de haut niveau. Sur la base de ces données, la participation de ces jeunes footballeurs à l'entraînement pendant deux saisons, a augmenté les concentrations de GH par rapport à des sujets témoins, ce qui peut représenter une adaptation à l'exercice d'entraînement de football. Le niveau basal des

concentrations plasmatiques d'IGF-1 et d'IGFBP3 reste fortement corrélé avec les performances physiques (CMJ, SQJ, 5J). Les niveaux des taux sériques d'IGF-1 et d'IGFBP3 peuvent être considérés comme des marqueurs endocriniens de la condition physique chez les jeunes joueurs de football.

IV.ETUDE 4

Effets de deux saisons footballistiques sur les qualités physiques et les réponses hormonales basales (axe cortico-gonadotrope) chez des jeunes joueurs élités

Physical and hormonal changes (cortical-gonadotropic axis) with two years intense exercise training in elite young athletes

Article soumis à Medicineand Science in Sports and Exercise (MSSE) (Décembre 2012)

IV.1. Introduction

En football, un joueur international parcourt entre 10 et 13km lors d'une rencontre (Rampinini et al. 2007a). Par conséquent, l'énergie dépensée provient majoritairement du métabolisme aérobie, mais il n'empêche que le métabolisme anaérobie joue un rôle déterminant dans cette activité. Mallo et Navarro, (2008) mentionnent que le football est un sport intermittent, caractérisé à haut niveau par une charge d'entraînement intense, dans laquelle les joueurs doivent s'entraîner à des hautes intensités variées, distribuées de façon acyclique. L'entraînement intense et la compétition sportive sont souvent associés à des déficits endocriniens chez les femmes et les hommes, par ailleurs, il est bien admis que l'entraînement physique peut affecter les réponses hormonales de l'axe gonadotrope (Keizer et al. 1989 ; Hackney et al. 2003). Certaines études ont analysé les réponses hormonales chez les joueurs de football lors d'un entraînement intense (Minetto et al. 2008) ainsi que lors des matchs d'entraînement (Moreira et al. 2009). Toutefois, les données de la littérature concernant ce sujet divergent. En effet, Calbet et al. (1999) ainsi que Filaire et al. (2001) ont montré que les valeurs de repos de testostérone chutent à la fin d'une période d'entraînement intensif. Alors que d'autres investigations ne notent pas de variations des taux de testostérone de repos (Nicklas et al. 1995; Mackinnon et al. 1997). Inversement, d'autres études (Hakkinen et Pakarinen, 1995; Kraemer et al. 1999) ont noté une augmentation des concentrations de testostérone de repos après entraînement intense. De même, concernant le cortisol, de nombreuses études ont mentionné que l'amélioration des performances chez les sportifs, serait associée à une augmentation significative des concentrations du cortisol au repos (Hoogeveen et Zanderland 1996; Filaire et al. 2001). Cependant, d'autres études n'observent pas la même chose et ne rapportent pas de modifications des valeurs basales de cortisol (Mujika et al. 1996; Bosco et al. 1996; Bonifazi et al. 2000 ; Filaire et al. 1998, 2001). Il

semble que les taux de cortisol au repos augmentent lorsque l'entraînement est particulièrement intense (Filiaire et al. 2001a, Wahl et al 2010, Thorpe et al 2012). De plus, l'entraînement a un effet positif sur la modulation du rapport Testostérone/Cortisol chez les jeunes entraînés (Leite et al. 2011). Certains auteurs ont observé aussi, que les testostéronémies élevées sont corrélées positivement avec la force développée chez des joueurs de football (Bosco et al. 1996; Bonifazi et al. 2001). Toutefois, il est important de noter que la majorité de ces études, s'intéressant aux effets de l'entraînement sur les réponses des hormones de l'axe cortico-gonadotrope, étaient soit transversales ou alors d'une durée insuffisantes. De plus, très souvent dans ces études, et tout particulièrement celles réalisées chez l'adolescent, le manque de groupe contrôle ne permet pas de juger des effets respectifs de l'entraînement et de la maturation pubertaire.

Dans le domaine du football, très peu de données existent relatives aux effets de l'entraînement intensif sur les réponses hormonales de l'axe cortico-gonadotrope. Récemment, Vääntinen et al. (2011) ont observé chez des jeunes footballeurs Finlandais des variations dans la composition corporelle, les concentrations hormonales et les aptitudes physiques après deux années de suivi. Toutefois, ces résultats ne sont pas tangibles étant donné que les joueurs appartenaient au niveau régional et étaient évalués uniquement au début et à la fin des deux années de suivi. A notre connaissance, aucune étude longitudinale (plus de 2 ans) n'a étudié l'impact de la pratique de football à haut niveau sur les réponses hormonales de l'axe cortico-gonadotrope en relation avec la charge d'entraînement chez des jeunes joueurs élités. Par conséquent, l'objectif de cette étude est d'évaluer les effets de deux saisons d'entraînement sur les qualités physiques et sur les concentrations hormonales (Testostérone, Cortisol, Sex Hormone Binding Globulin (SHBG) et le rapport Testostérone/Cortisol (T/C)) chez les jeunes joueurs de football d'élite appartenant à l'équipe nationale de Tunisie U17. Pour juger de l'effet respectif de l'entraînement et de la maturation pubertaire des sujets contrôles non-entraînés de même âge biologique ont participé à cette étude.

IV.2. Méthode

La même population que l'étude précédente ainsi que le même protocole expérimental sont utilisés au cours de cette 4^{ème} et dernière étude. Les concentrations sériques de Testostérone (T), de Cortisol (C), d'SHBG et du rapport T/C ont été évaluées lors de 5 temps tout au long des deux saisons sportives.

La description détaillée du protocole se trouve dans la partie consacrée à la méthodologie générale du présent document.

IV.3.Résultats

Les résultats concernant l'évolution des paramètres anthropométriques et des performances physiques ont été présentés et discutés dans l'étude 3.

Concentrations hormonales

L'évolution des concentrations hormonales de deux groupes en fonction des différentes périodes pendant les deux saisons footballistiques de suivi est présentée dans le **tableau 1**.

Ces résultats montrent qu'il existe des différences significatives chez les jeunes footballeurs concernant les taux de Testostérone lors des périodes T1-T2 et T2-T3 ($p<0.01$) et après la période totale (T0-T4) ($p<0.001$). Aucune différence significative n'a été constatée dans le groupe contrôle. Nous avons observé des différences significatives (Δ) en ce qui concerne les concentrations de Testostérone entre les deux groupes dans les périodes T1-T2, T2-T3 et T0-T4 ($p<0.01$).

Les concentrations de cortisol montrent des différences significatives chez les jeunes footballeurs lors de T0-T1, T1-T2 et T0-T4 ($p<0.01$). De plus, il existe des différences significatives chez les sujets contrôles lors de T2-T3, T3-T4 et T0-T4 ($p<0.01$). Des différences significatives (Δ) concernant les concentrations basales de cortisol entre les jeunes joueurs de football et les sujets contrôles ont été observées lors de T2-T3, T3-T4 et T0-T4 ($p<0.01$).

L'évolution des concentrations d'SHBG présente des différences significatives lors de T0-T4 à la fois chez les joueurs de football et les sujets contrôles. Des différences significatives (Δ) concernant les taux d'SHBG entre les deux groupes ont été observées lors des périodes T1-T2 et T0-T4 ($p<0.01$).

L'évolution des concentrations hormonales du rapport T/C montrent des différences significatives chez les jeunes footballeurs lors de T1-T2 et T0-T4 ($p<0.01$). De plus, il existe des différences significatives chez les sujets contrôles lors de T0-T1 et T0-T4 ($p<0.01$). Des

différences significatives (Δ) concernant les concentrations basales de cortisol entre les jeunes joueurs de football et les sujets contrôles ont été observées lors de T0-T1, T1-T2, T3-T4 et T0-T4 ($p < 0.01$).

Tableau 1: Evolution des concentrations de testostérone, de cortisol et d'SHBG ainsi que le rapport T/C chez les footballeurs et des sujets contrôles lors des différentes périodes des deux saisons de suivi (moyenne \pm DS).

Variables	Testostérone		Cortisol		SHBG		T/C	
	Δ		Δ		Δ			
Groupes	FB	C	FB	C	FB	C	FB	C
T0-T1	0,05	0,11	-73,73*	8,11£	-1,87	-2,33	0,002	0,006*£
T1-T2	0,70*	0,05£	-72,94*	18,13	0,01	-2,15£	0,003*£	-0,002
T2-T3	0,44*	-1,14£	-7,85	-142,0*£	-1,89	-1,68	0,001	0,003
T3-T4	0,27	1,22	-10,61	91,96*£	-3,48	-0,18	0,002£	-0,002
T0-T4	1,46**	0,24£	-166,13*	-23,82*£	-7,97*	-6,34*£	0,008*£	0,005*

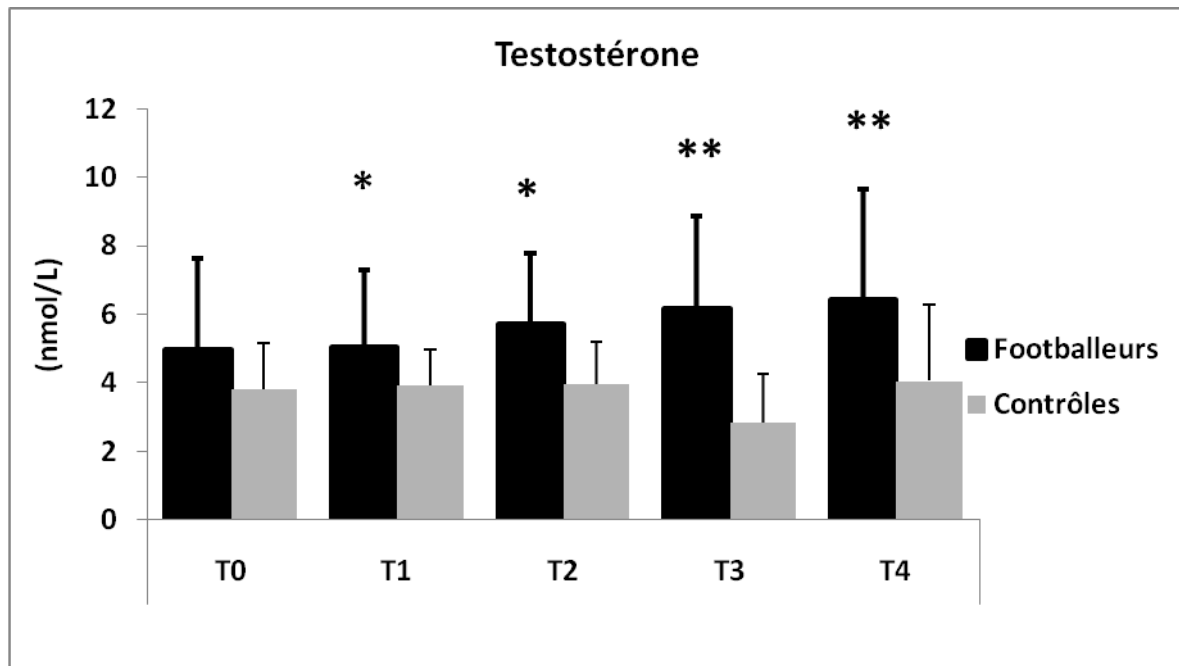
Δ : Variations des concentrations hormonales; FB: Footballeurs; C: Contrôles

£ : Différences significatives entre les footballeurs et les sujets contrôles. £ : $p < 0.01$.

* : Différences significatives entre les différentes périodes. * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

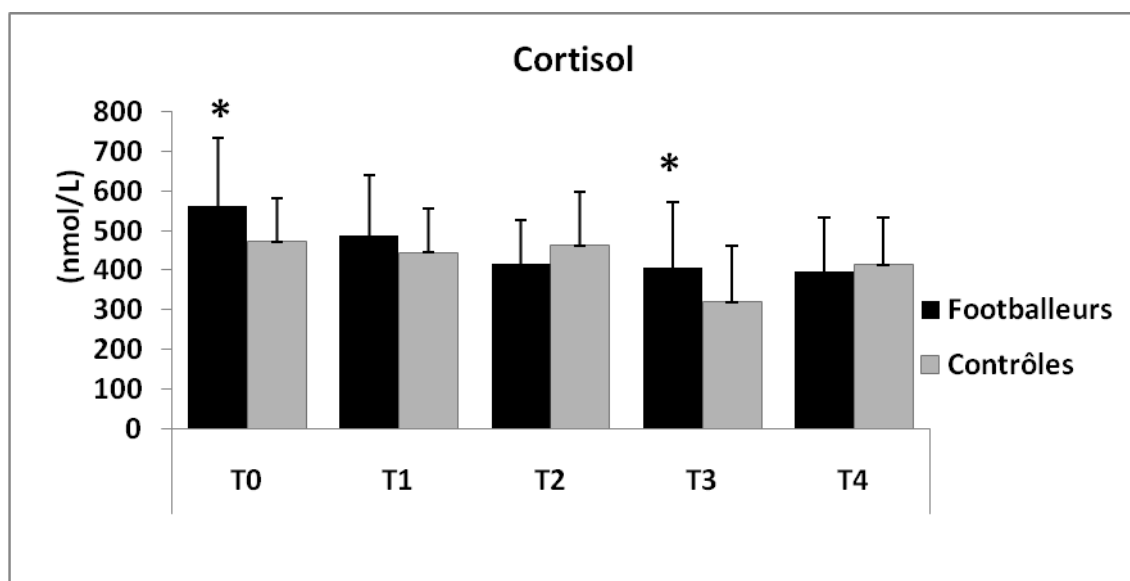
La figure 1 montre des différences significatives dans les concentrations de Testostérone entre les jeunes footballeurs et les sujets contrôles à T1 et T2 ($p < 0.01$). Les mêmes différences sont observées à T3 et T4 ($p < 0.001$).

Figure 1: Différences des concentrations de testostérone des footballeurs comparés aux contrôles (moyenne \pm DS).



* : différences significatives entre les deux groupes. * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

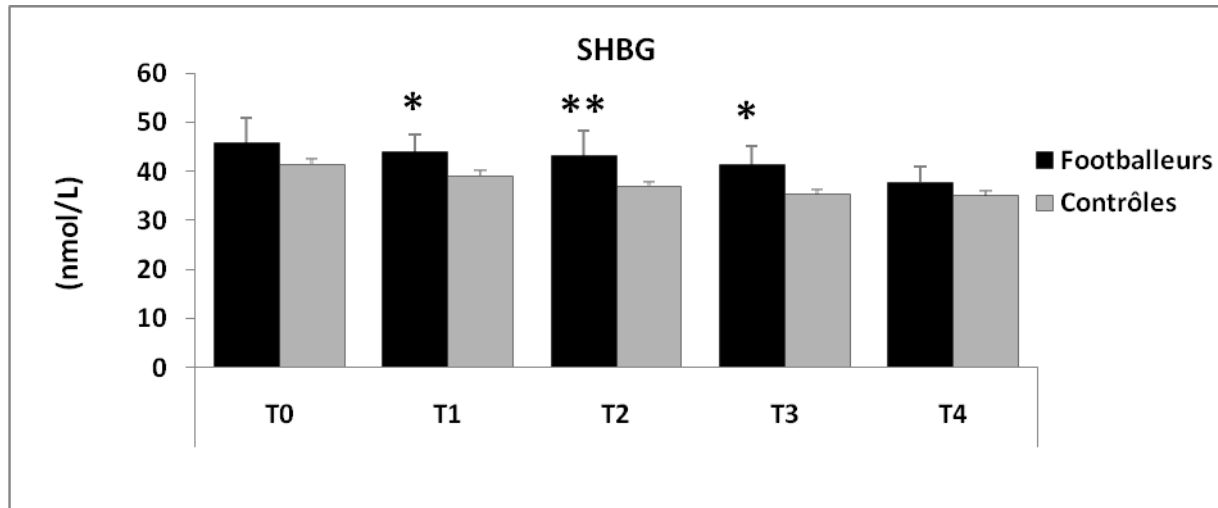
Figure 2: Différences des concentrations de cortisol des footballeurs comparés aux sujets contrôles (moyenne \pm DS).



* : différences significatives entre les deux groupes. * $p < 0.01$.

La figure 2 montre des différences significatives dans les concentrations de cortisol entre les deux groupes à T0 et T3 ($p < 0.01$).

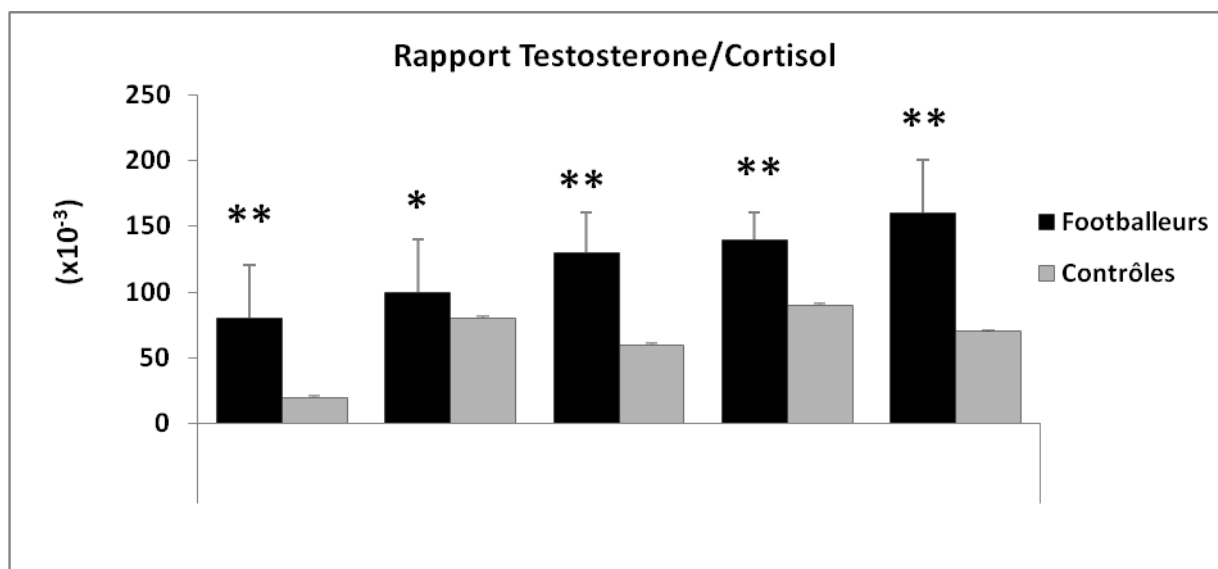
Figure 3: Différences des concentrations de la SHBG des footballeurs comparés aux sujets contrôles (moyenne \pm DS).



* : différences significatives entre les deux groupes. * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

Pour la SHBG, **la figure 3** montre que des différences significatives sont observées entre les deux groupes à T1, T2 et T3 ($p < 0.01$).

Figure4 : Différence des valeurs du rapport T/C des footballeurs comparés aux sujets contrôles (moyenne \pm DS).



* : différences significatives entre les deux groupes. * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

La figure 4 montre que des différences significatives sont observées entre les deux groupes à tous les points de l'étude tout au long des deux saisons de suivi.

♦ **Corrélations entre les hormones et les paramètres physiques**

Le tableau 2 montre les corrélations entre les concentrations de Testostérone (T) ou encore le rapport T/Cet les performances physiques chez nos footballeurs. Par contre, l'analyse de régression ne montre aucune corrélation significative entre les concentrations de cortisol, SHBG et les paramètres physiques.

♦ **Corrélations entre les hormones et la RPE**

Le tableau 3 montre que pour les joueurs de football, la Testostérone est significativement corrélée à la RPE à T4 ($r=0,27$; $p<0,05$). De plus, le cortisol est significativement corrélé à la RPE à T2 ($r=0,29$; $p<0,05$) et à T4 ($r=0,27$; $p<0,05$). Pour la SHBG, une corrélation significative a été observée uniquement avec la RPE à T4 ($r=0,31$; $p<0,05$).

Tableau 2: Relations entre les paramètres physiques et les concentrations hormonales (T, C, T/C et SHBG) chez les footballeurs à T0 et T4.

Variables	CMJ (cm)		SqJ (cm)		5J (cm)		30m (s)		YYIRT (m)		VO ₂ max (ml/min/kg)	
Correlation	(r)		(r)		(r)		(r)		(r)		(r)	
Périodes	T0	T4	T0	T4	T0	T4	T0	T4	T0	T4	T0	T4
Testostérone (nmol/L)	0,28*	0,31*	0,27*	0,29*	0,21	0,23	0,09	0,07	0,29*	0,31*	0,30*	0,33*
Cortisol (nmol/L)	0,17	0,19	0,14	0,17	0,15	0,16	0,17	0,16	0,17	0,24	0,21	0,22
SHBG (nmol/L)	0,20	0,21	0,22	0,24	0,09	0,13	0,04	0,05	0,08	0,12	0,15	0,16
T/C	0,33*	0,20	0,15	0,21	0,34*	0,39*	0,17	0,15	0,18	0,38*	0,14	0,33*

CMJ: countermovement jump (cm); **SqJ:** squat jump (cm); **5J:** 5 jump test (m); **30m:** temps en 30m (s); **(VO₂max):** consommation maximale d'oxygène (ml/min/kg) ; * : Corrélations significatives; *: p< 0.05.

Tableau3:Relation entre la valeur de RPE et les concentrations hormonales (Testostérone, Cortisol, SHBG et T/C) chez les footballeurs.

Mesures	Footballeurs	(RPE scores)	(r)
Testostérone (nmol/L)			
T1 (16 semaines)	5,03 ± 2,24	7504 ± 3204,15	0,18
T2 (16 semaines)	5,73 ± 2,03	11872 ± 4021,39	0,25
T4 (24 semaines)	6,44 ± 3,20	15240 ± 2436,28	0,27*
Cortisol (nmol/L)			
T1 (16 semaines)	489,12 ± 151,21	7504 ± 3204,15	0,12
T2 (16 semaines)	475,18 ± 110,67	11872 ± 4021,39	0,29*
T4 (24 semaines)	396,72 ± 137,83	15240 ± 2436,28	0,27*
SHBG (nmol/L)			
T1 (16 semaines)	43,91 ± 3,72	7504 ± 3204,15	0,14
T2 (16 semaines)	43,18 ± 5,24	11872 ± 4021,39	0,21
T4 (24 semaines)	37,18 ± 3,21	15240 ± 2436,28	0,31*
Rapport T/C			
T1 (16 semaines)	0,0075±0,0044	7504 ± 3204,15	0,16
T2 (16 semaines)	0,0085±0,0037	11872 ± 4021,39	0,15
T4 (24 semaines)	0,012±0,0041	15240 ± 2436,28	0,18

* Corrélations significatives ; *: $p < 0.05$.

IV.4. Discussion

A notre connaissance, la présente étude est parmi les premières à s'intéresser aux effets de l'entraînement en football à haut niveau (deux saisons footballistiques) sur les concentrations hormonales basales de l'axe cortico-gonadotrope (Cortisol, Testostérone, SHBG et T/C) en relation avec les aptitudes physiques chez des jeunes footballeurs élités. Ces variations ont été aussi évaluées chez un groupe contrôle de même âge biologique.

Il faut rappeler tout d'abord que la testostérone circulante et le cortisol ont été proposés comme des indicateurs physiologiques pour les hommes et les femmes pour évaluer l'état de l'anabolisme et du catabolisme de l'organisme (Kraemer, 2000) et ont été utilisés comme un index des adaptations du système endocrinien à l'entraînement (Kraemer et al.

1995). La testostérone et le cortisol jouent un rôle important dans le métabolisme des protéines ainsi que dans celui des hydrates de carbone. Les deux hormones sont des agonistes compétitifs au niveau des récepteurs des cellules musculaires (Urhausen et al. 1995).

Les résultats de la présente étude montrent des différences significatives en ce qui concerne les concentrations de testostérone et du rapport T/C chez les jeunes joueurs footballeurs par rapport aux sujets contrôles tout au long des deux saisons de suivi. Il est à remarquer aussi que les taux de testostérone et du rapport T/C ont augmenté dans les mêmes périodes de manière significative en faveur des footballeurs par rapport aux sujets témoins. En effet, ceci a été observé lors des périodes T1-T2, T2-T3 et pendant la période totale T0-T4. Toutefois, des baisses significatives du cortisol ont été observées dans les deux groupes à T2-T3, T3-T4 et pendant la période totale T0-T4. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Tosolakis et al. (2003) qui ont trouvé des différences significatives dans les valeurs moyennes de Testostérone dans différents groupes d'athlètes et dans différentes disciplines sportives comme l'aviron et le handball. Hansen et al. (1999) ont mesuré des concentrations de Testostérone significativement plus élevées chez les jeunes footballeurs élites comparés à des non-élites.

Nos résultats ont montré des augmentations des taux de T et des diminutions des taux de C pour les jeunes joueurs par rapport aux sujets contrôles. Etant donné que le football est caractérisé par des exercices intermittents de haute intensité (Eliakim et al. 2009, Leit et al. 2011), la prévalence d'une période d'entraînement à long terme peut expliquer ces réponses des hormones anabolisantes et catabolisantes dans cette étude (Kraemer et al. 1999; Hakkinen et al. 1995). De plus, Grandys et al. (2009) ont démontré qu'un entraînement d'endurance à court terme à une intensité modérée avec un faible volume augmente les concentrations de T chez des hommes non entraînés. Cependant, contrairement aux autres études, Kraemer et al. (2004) ou encore DA Silva et al. (2011) ont montré que la relation antagoniste entre ces hormones n'a pas conduit à une baisse de performance. Selon DA Silva et al. (2011) et Kraemer et al. (2004), l'entraînement intense de type sprint augmente les taux de C et diminue les taux de testostérone. Hoogeveen et Zanderland (1996), ont mentionné que l'amélioration des performances chez les sportifs, augmente les concentrations du cortisol au repos, par contre d'autres la contredisent (Bosco et al. 1996 ; Bonifazi et al. 2000). Alors que d'autres auteurs, ne rapportent pas de changement des taux du cortisol de repos (Mujika et al. 1996; Filaire et al. 1998, 2001). Il semble d'après Filaire et al. (2001) que les taux de cortisol au

repos augmentent lorsque l'entraînement est particulièrement intense. De plus l'entraînement a un effet positif sur la modulation du rapport Testostérone/Cortisol chez les jeunes entraînés (Leite et al. 2011).

Des corrélations significatives entre les concentrations de T et les paramètres physiques (CMJ, SqJ, YYIRT1 et VO_{2max}) ainsi qu'entre le rapport T/C et le CMJ, 5J, YYIRT1 et le VO_{2max} , ont été observées chez les jeunes footballeurs au début de l'étude et après deux saisons de suivi. On considère que les réponses positives des performances physiques observées après deux saisons d'entraînement de football peuvent être en relation avec le fait que les taux de T augmentent à travers chaque temps d'évaluation de T1 à T4 (Hanssen et al. 1999; Grandys et al. 2009; DA Silva et al. 2011).

Dans des études précédentes réalisées chez des hommes non entraînés (Grandys et al. 2009) et des jeunes hommes entraînés (Derbré et al. 2010), les niveaux des aptitudes physiques sont connus pour être corrélés aux taux de T. Peu d'études peuvent affirmer que la T augmente avec l'entraînement et diminue avec le surentraînement (Urhausen et al. 1995). De telles corrélations indiquent que chez les adolescents en bonne santé, l'exercice à haute intensité est associé à la haute activité du système des hormones sexuelles en favorisant l'état anabolisant.

La testostérone agit de manière synergique avec l'axe somatotrope dans le tissu favorisant l'anabolisme pendant la puberté (Mauras et al. 1996). L'exercice et l'activité physique régulière induisent des changements dans la Testostérone (Cumming et al. 2000). Les résultats dans la littérature concernant l'adaptation de cette hormone à l'entraînement sont très divergents (Cumming et al. 2000). Cette adaptation de l'axe gonadotrope comme l'axe somatotrope dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels les caractéristiques impliquées dans l'entraînement d'une activité sportive à une autre (Cumming et al. 2000, Eliakim et al. 2006).

Les résultats de cette étude montrent une modification des niveaux de SHBG chez les jeunes joueurs et les sujets contrôles. Ainsi, des différences significatives de SHBG ont été observées entre les deux groupes à T0, T1, T2 et T3 après deux saisons d'entraînement. Ceci a été accompagné par une augmentation des concentrations de la Testostérone plasmatique, alors qu'une baisse des concentrations de SHBG a été détectée. Les niveaux de SHBG baissent au cours de la puberté avancée chez les garçons et les filles (Sorensen et al. 2009). Les niveaux de SHBG dépendent fortement de la composition corporelle et des niveaux des

stéroïdes sexuels chez les enfants avec une puberté normale et précoce. Cependant, dans notre étude, aucune relation n'a été observée entre la SHBG et les performances physiques chez les footballeurs dans tous les temps de mesures tout au long de deux saisons. Par contre, dans d'autres études la SHBG était liée positivement à l'aptitude aérobie (Sorensen et al. 2009) et à la force musculaire chez des jeunes hommes en bonne santé après un programme d'entraînement (Grandys et al. 2008).

Dans la littérature, la RPE est considérée comme un outil fiable pour quantifier indirectement la charge d'entraînement en se basant sur sa relation avec les indicateurs physiologiques de l'exercice (Irving et al. 2006) et ne semble pas être affecté par les modalités de l'exercice ou l'état de l'entraînement (Hetzler et al. 1991; Seip et al. 1991). En plus des corrélations entre les paramètres physiques et les concentrations de Testostérone et du rapport T/C, nos résultats ont montré des corrélations significatives entre les concentrations hormonales de T, C et SHBG et les valeurs de RPE chez les jeunes footballeurs. Cette association entre les concentrations hormonales et la perception de l'effort peut être liée à l'augmentation de l'intensité des charges d'entraînement durant les deux saisons de suivi. Ce résultat est en accord avec la majorité des recherches récentes qui ont utilisé la RPE chez des jeunes sportifs pour estimer et quantifier la charge d'entraînement (Marinova et al. 2008, Brink et al. 2010, Mortatti et al. 2012). Pendant l'adolescence, il semble que le suivi de la charge d'entraînement des jeunes joueurs préviendrait le développement du syndrome de surentraînement (Tanskanen et al. 2011). Ainsi, nos résultats confirment que les concentrations de T, C et SHBG peuvent être des outils utiles pour juger de la bonne dose des charges d'entraînement chez les joueurs de football de haut niveau (Brink et al. 2010 ; Mortatti et al. 2012).

En conclusion, cette étude montre que la pratique de football à haut niveau n'altère pas les réponses hormonales de l'axe cortico-gonadotrope et peut même avoir un effet bénéfique sur le développement, la croissance et l'amélioration des performances physiques. Nos résultats indiquent aussi qu'il serait intéressant d'incorporer ce genre de mesures dans le suivi longitudinal du joueur de football de haut niveau afin de prévenir le surentraînement, d'éviter les blessures et de préserver l'intégrité physique.

CONCLUSION GENERALE

Dans la première étude de ce travail de thèse, nous avons évalué les paramètres anthropométriques et physiques des jeunes footballeurs élités tunisiens au cours d'une saison, et nous avons essayé de voir s'il existait des différences entre les jeunes joueurs footballeurs en fonction de leurs positions de jeu. Nos résultats montrent une amélioration significative des caractéristiques anthropométriques et des paramètres physiques durant une saison sportive chez ces jeunes footballeurs élités. Ils s'expliquent essentiellement par les effets de l'entraînement physique réalisé au cours de cette saison. Toutefois, en l'absence de groupe contrôle l'effet de la maturation pubertaire ne peut pas être occulté. Par ailleurs, aucune distinction en fonction de la position de jeu n'a été constatée dans cette étude. Ce dernier résultat s'expliquerait essentiellement par les caractéristiques d'entraînement proposé durant cette saison (pas assez spécifique et individualisé) qui ne permettent pas de distinguer les joueurs en fonction du poste occupé.

Dans notre deuxième étude, nous avons évité le biais méthodologique (lié à la maturation pubertaire) de la première étude en intégrant un groupe contrôle. Nous avons étudié l'évolution des paramètres physiques et anthropométriques chez des adolescents footballeurs élités et chez des sujets contrôles de même âge biologique. Nos résultats confirment ceux de la première étude à savoir une amélioration significative des performances physiques uniquement chez les jeunes footballeurs confirmant les effets de l'entraînement footballistique réalisé au cours de cette saison. De plus, nos résultats montrent aussi des variations statistiquement significatives en ce qui concerne les paramètres anthropométriques uniquement chez les jeunes footballeurs. Ces derniers résultats indiquent une probable accélération de la maturation pubertaire liée à la pratique footballistique de haut niveau.

Dans la troisième étude, nous avons étudié durant deux saisons footballistiques, chez des adolescents footballeurs élités, les effets de l'entraînement physique de haut niveau sur les marqueurs de la croissance et du développement en relation avec l'anthropométrie et les performances physiques. Durant la même période ces jeunes footballeurs ont été comparés à des sujets contrôles de même âge biologique. Nous avons tout particulièrement étudié les réponses des hormones impliquées dans la croissance à savoir la GH, l'IGF-1 et l'IGFBP-3. Nos résultats montrent que l'entraînement en football à haut niveau réalisé pendant deux saisons sportives n'a pas d'effet négatif sur les concentrations hormonales basales de l'axe somatotrope. Ils montrent même des augmentations significatives au cours des deux saisons des concentrations plasmatiques de GH, d'IGF-I et d'IGFBP-3 uniquement chez le groupe des

footballeurs en comparaison avec le groupe contrôle. Ces résultats vont dans le sens d'une adaptation positive de l'axe somatotrope à l'entraînement de football de haut niveau chez l'adolescent. De plus, les niveaux d'IGF-1 et d'IGFBP3 sont fortement corrélés avec les performances physiques (CMJ, SqJ, 5J) uniquement chez les footballeurs.

Enfin, dans notre quatrième et dernière étude, nous avons évalué les effets des deux saisons d'entraînement sur les qualités physiques et les concentrations hormonales de l'axe cortico-gonadotrope chez les jeunes footballeurs élites qui ont été comparés à des sujets contrôles de même âge biologique. Les principaux résultats de cette dernière étude montrent des variations dans les concentrations hormonales (Testostérone (T), SHBG, Cortisol (C) et le rapport T/C) et les paramètres physiques chez le groupe des jeunes footballeurs par rapport à leurs homologues du groupe contrôle durant les deux saisons de suivi. De plus, nos résultats montrent que les taux de testostérone ainsi que ceux du rapport T/C étaient fortement corrélés aux performances physiques (CMJ, SqJ, YOYOIRT1 et VO₂max) uniquement chez les jeunes footballeurs. De même, des corrélations significatives étaient observées entre la RPE et les concentrations hormonales (T, C et SHBG) surtout à T4.

INTÉRÊTS PRATIQUES

D'un point de vue pratique, ce travail de thèse montre que l'analyse et le suivi longitudinal des caractéristiques anthropométriques, physiques et physiologiques des jeunes footballeurs ne peut être que bénéfique sur le plan pratique. Notre travail a permis, au moins en partie de répondre à cette problématique en établissant un profil de référence du jeune joueur élite tunisien. Ce genre de suivi permet une certaine aide dans le processus de détection des jeunes joueurs en établissant un référentiel anthropométrique, physique et physiologique en fonction du poste occupé sur le terrain.

Nous avons observé que les jeunes joueurs élités Tunisiens ont des profils anthropométriques similaires à ceux de leurs homologues Européens et différents de ceux des Brésiliens et des Asiatiques. Sur le plan des qualités physiques, en ce qui concerne le potentiel aérobie, nos résultats sont semblables à ceux observés dans les autres nations, mais les qualités anaérobies et surtout en ce qui concerne la puissance des membres inférieurs ou encore la vitesse, les jeunes élités Européens sont meilleurs que les jeunes élités Tunisiens. Ce constat indique une orientation précise à donner aux différents contenus et programmes d'entraînements réalisés au sein des académies de football des jeunes en Tunisie et incite la Direction Technique Nationale de football à diffuser ce genre de résultats à l'échelle national.

Malgré que les données de la littérature soient divergentes concernant l'effet de l'entraînement sur les concentrations hormonales, nous avons pu mettre en évidence au cours de notre travail de thèse que le système endocrinien et tout particulièrement les axes somatotropes et cortico-gonadotrope ne semblent pas être affectés par l'entraînement réalisé au sein de cette académie de l'élite tunisienne. Il semble même être bénéfique. Comme d'autres études auparavant nous avons aussi montré que les niveaux des taux sériques d'IGF-1 et d'IGFBP3, sont fortement corrélée avec les performances physiques (CMJ, SQJ, 5J). Par conséquent, ces marqueurs endocriniens peuvent être considérés comme des indexes de la condition physique et du bon fonctionnement du système endocrinien chez les jeunes joueurs de football. Les mêmes constatations sont valables pour l'axe cortico-gonadotrope surtout pour ce qui concerne la testostérone et le rapport T/C.

Ainsi, en plus des suivis anthropométrique, physique, physiologique, nutritionnel et psychologique des jeunes joueurs de football, un suivi endocrinien des joueurs élités au sein des centres nationaux ou des académies de football est très fortement conseillé. Il s'agit d'un outil pertinent permettant certainement de bien veiller à l'intégrité physique et à la bonne santé des jeunes sportifs en réduisant les risques de blessures ou encore du surentraînement.

PERSPECTIVES

Au terme de cette analyse, différentes perspectives peuvent être envisagées. En effet, ce travail permet de répondre à certaines questions relatives à l'influence de l'entraînement footballistique de haut niveau sur l'évolution des paramètres anthropométriques, physiques, physiologiques et hormonaux chez des jeunes adolescents. Toutefois, ce suivi n'a été réalisé que sur deux saisons footballistiques ce qui est insuffisant pour bien comprendre et maîtriser les effets à long terme de ce type d'entraînement intensif. Par conséquent, ce genre d'étude doit être poursuivie sur une très longue période (tout le long de la carrière de ces jeunes joueurs) afin de permettre de dégager des profils types des joueurs tunisiens voir nord africains réussissant à très haut niveau et d'adapter les contenus et programmes d'entraînement. De plus, ce suivi à très long terme permettra certainement de préciser l'impact et les effets de l'entraînement intensif en football sur la santé et l'intégrité physique.

Dans nos différentes études les suivis nutritionnel et psychologique n'ont pas été intégrés. Il serait souhaitable, dans les futures études de suivi longitudinal, d'incorporer ces paramètres dans l'analyse des adaptations à l'entraînement footballistique de haut niveau. De plus, d'autres paramètres endocriniens ainsi que d'autres facteurs physiques (qualités d'agilité, de répétition de sprint, de coordination etc.), physiologiques (mesures directes en laboratoire etc.) doivent faire partie de ce genre de suivi longitudinal.

Dans nos différentes études, les prélèvements sanguins ont été réalisés au repos uniquement ce qui ne permet pas de rendre compte des réponses et des adaptations à l'exercice. Il serait intéressant de réaliser des prélèvements sanguins lors du match ou au moins à la mi-temps et en fin de match afin de bien préciser les réponses hormonales à ce genre d'épreuve.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A.

Adiyaman P, Ocal G, Berberoğlu M, Evliyaoğlu O, Aycan Z, Cetinkaya E, Bulca Y, Ersöz G, Akar N. Alterations in serum growth hormone (GH)/GH dependent ternary complex components (IGF-I, IGFBP-3, ALS, IGF-I/IGFBP-3 molar ratio) and the influence of these alterations on growth pattern in female rhythmic gymnasts. *J Pediatr Endocrinol Metab*, 2004; 17:895-903.

Agnevik G. Football Rapport. Idrottsfysiologi, Trygg-Hansa, Stockholm, 1970.

Aïssa Benhaddad A, Bouix D, Khaled S, Micallef JP, Mercier J, Bringer J, Brun JF. Early emorheologic aspects of overtraining in elite athletes. *Clin Hermorheol Microcirc*, 1999; 20:117-125

Alen M, Pakarinen A, Häkkinen K, Komi PV. Responses of serum androgenic-anabolic and catabolic hormones to prolonged strength training. *Int J Sports Med*, 1988; 9:229-233.

Alfredson H, Nordström P, Lorentzom R. Total and regional bone masse in female soccer players. *Calcified Tissue International*, 1996; 59:438-442.

Al-Hazzaa H. Development of maximal cardiorespiratory function in Saudi boys. A cross-sectional analysis. *Saudi Med J*, 2001; 22:875-881.

Ali A, Farrally M. Recording soccer players' heart rates during matches. *J Sports Sci*, 1991, 9:183-189.

Allen P, Batty K, Dodd C, Herbert J, Hugh C, Moore G, Seymour, Shiers H, Stacey P, Young S. Dissociation between emotional and endocrine response preceding an academic examination in male medical students. *J Endocrinol*, 1985; 107:163-170.

Apor P. Successful formulae for fitness training. In: Reilly T, Lees A, Davids K, et al., editors. *Science and football*. London: E & FN Spon, 1988: 95-107

Arnason A, Sigurdsson S, Gudmundsson A, Holme I, Engebretsen L, Bahr R. Physical fitness, injuries, and team performance in soccer. *Med.Sci.Sports Exerc*, 2004; 36:278-285.

Astrand P, Rodahl K, Dahl H. Textbook of work physiological bases of exercise. Windsor(Canada), Eds Human Kinetics, 2003.

B.

Bahrke M, Yesalis C, Wright J. Psychological and behavioral effects of endogenous testosterone levels and androgenic-anabolic steroids among males. *Sports Med*, 1990; 10:303-307.

Balsom P, Ekblom B, Söderlund K, Sjodin B, Hultman E. Creatine supplementation and dynamic high-intensity intermittent exercise. *Scand J Med Sci Sports*, 1993; 3:143-149.

Balsom P, Segger J, Ekblom B. A physiological evaluation of high intensity intermittent exercise. Abstract from the 2nd World Congress on Science and Football Veldhoven, 1991:22-25.

Bambino T, Hsueh A. Direct inhibitory effect of glucocorticoids upon testicular luteinizing hormone receptor and steroidogenesis in vivo and in vitro. *Endocrinal*, 1981; 108:2142-2148.

Bang P, Brandt J, Degerblad M, Enberg G, Kaijser L, Thoren M, Hall K. Exercise-induced changes in insulin-like growth factor their low molecular weight binding protein in healthy subjects and patients with growth hormone deficiency. *Eur J Clin Invest*, 1990; 20:285-292.

Bangsbo J, Norregard L, Thorso F. Activity profile of competition soccer. *Can J Sport Sci*, 1991; 16:110-116.

Bangsbo J. Energy demands in soccer. *Brucosport*, Brugge, 1995; 13-14, October.

Bangsbo J, Iaia F, Krstrup P. The Yo-Yo intermittent recovery test: a useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. *Sports Med*, 2008; 38:37-51.

Bangsbo J, Mohr M, Krstrup P. Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. *J Sports Sci*, 2006; 24:665-674.

Bangsbo J, Mohr M, Allan P, Jorge P, Krstrup P. Training and testing the elite athlete. *J Exerc Sci Fit*, 2006; v4; n°1.

Bangsbo J. The physiology of soccer: with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiol Scand*, 1994; 15 Suppl. 619: 1-156

Baquet G, Berthon S, Dupont G, Blondel N, Fabre C, Van Praagh E. Effects of high intensity intermittent training on peak VO₂ in prepubertal children. *International Journal. Sports Medicine*, 2002; 23:439-444.

Barbarino A, De Marinis L, Tofani A, Della Casa S, D'Amico C, Mancini A, Corsello SM, Scuito R, Barini A. Corticotropin-releasing hormone inhibition of gonadotropin release and effect of opioid blockade. *J Clin Endocrinal Metab*, 1989; 68:523-528.

- Barron J, Noakes T, Levy W, Smith S, Millar R.** Hypothalamic dysfunction in overtrained athletes. *J Clin Endocrinol Metab*, 1985; 60:803-806.
- Barros R, Misuta M, Menezes R, Figueroa P, Moura F, Cunha S, Anido R, Leit N.** Analysis of the distances covered by first division brasilian soccer players obtained with an automatic tracking method. *J Sports Sci*, 2007; 6:233-242.
- Baxter-Jones A, Goldstein H, Helms P.** The development of aerobic power in young athletes. *Journal of Applied Physiology*, 1993; 75:1160-1167.
- Baxter RC.** Insulin-like growth factor binding proteins in the human circulation: a review. *Horm Res*, 1994; 42:140-144.
- Baxter-Jones A, Helms P, Maffulli N, Baines-Preece J, Preece M.** Growth and development of male gymnasts, swimmers, soccer and tennis players: a longitudinal study. *Ann Hum Biol*, 1995; 22:381-394.
- Berelowitz M, Szabo M, Frohman L, Firestone S, Chu L, Hintz R.** Somatomedin-C mediates growth hormone negative feedback by effects on both the hypothalamus and the pituitary. *Science*, 1981; 212:1281-1279.
- Bergeron M, Maresh C, Kraemer W, Abraham A, Conroy B, Gabaree C.** Tennis: A physiological profile during match play. *Int J Sport Med*, 1991; 12:474-479.
- Bermon S, Ferrari P, Bernard P, Altare S, Dolisi C.** Responses of total and free insulin-like growth factor-I and insulin-like growth factor binding protein-3 after resistance exercise and training in elderly subjects. *Acta Physiol Scand*, 1999; 165:51-56.
- Bland J and Altman D.** Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurements. *The Lancet*, 1986; 8: 307-310.
- Blinkie C, Roache P, Hay J, Bar O.** Anaerobic power of arm in teenage boys and girls; relationship to lean tissue. *European Journal of Applied physiology*, 1988; 57:677-683.
- Bloomfield J, Polman R, Butterly R, O'Donoghue P.** Analysis of age, stature, body mass, BMI and quality of elite soccer players from 4 European Leagues. *J Sports Med Phys Fitness*, 2005; 45:58-67.
- Bloomfield J, Polman R, O'Donoghue P.** The Bloomfield Movement Classification: Motion Analysis of Individual Players in Dynamic Movement Sports. *International Journal of Performance Analysis of Sport*, 2004; 4: 20-31.
- Bloomfield J, Polman R, O'Donoghue P, McNaughton L.** Effective speed and agility conditioning methodology for random intermittent dynamic type sports. *J Strength Cond Res*, 2007; 21:1093-1100.

- Blum W, Albertsson-Wikland K, Rosberg S, Ranke M.** Serum levels of insulin-like growth factor I (IGF-1) and IGF binding protein 3 reflect spontaneous growth hormone secretion. *J Clin Endocrinol Metab*, 1993; 76:1610-1616.
- Blum W, Ranke M, Keitzmann K, Gauggel E, Zisel H, Bierich J.** A specific radioimmunoassay for growth-hormone dependent somatomedin-binding protein: its use for diagnosis of GH deficiency. *J Clin Endocrinol Metab*, 1990; 70:1292-1298.
- Bolm-Audroff U, Schwämmle J, Ehlenz K, Koop H, Kaffarnik H.** Hormonal and cardiovascular variations during a public lecture. *Eur J Appl Physiol*, 1989; 54:669-674.
- Bonifazi M, Bela E, Lupo C, Martelli G, Zhu B, Carli G.** Influence of training on the concentrations in human swimmers. *Eur J Appl Physiol*, 1998; 78:388-397.
- Bonifazi M, Bosco C, Colli R, Lodi L, Lupo C, Massai L, Muscettola M.** Glucocorticoid receptors in human peripheral blood mononuclear cells in relation to explosive performance in elite handball players. *Life Sciences*, 2001; 69:961-968.
- Bonifazi M, Sardella F, Lupo C.** Preparatory versus main competitions: difference in performances, lactate responses of serum hormones and pre-competition plasma cortisol concentrations in elite male swimmers. *Eur J Appl Physiol*, 2000; 82:368-373.
- Bonnefont X, Lacampagne A, Sanchez-Hormigo A, et al.** Revealing the large-scale network organization of growth hormone-secreting cells. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2005; 102:16880-16885.
- Borms J.** Early identification of athletic talent. Keynote Address to the International Pre-Olympic Scientific Congress, Dallas, TX, USA; 1996.
- Borst S, De Hoyos D, Garzarella L.** Effects of resistance training on insulin-like growth factor-I and IGF binding proteins. *Med Sci Sports Exerc*, 2001; 33:648-653.
- Borst S, Vincent K, Lowenthal D, Braith R.** Effects of resistance training on insulin-like growth factor and its binding proteins in men and women aged 60 to 85. *J Am Geriatr Soc*, 2002; 50:884-888.
- Bosco C, Tihany J, Rivalta L, Tranquilli C, Pulvirenti G, Viru A.** Hormonal responses in strenuous jumping effort. *J Appl Physiol*, 1996; 46:93-98.
- Bouassida A, Zaouali M, Latiri I, Zellag D, Ben Mdella S, Richalet J, Tabka Z.** Cinétique du cortisol et de l'hormone de croissance plasmatique lors de deux épreuves sous-maximales avec et sans récupération. *Science & Sports*, 2003; 18:20-22.
- Bouhaddioui L, Brun J, Jacquemin J, Bailly A.** Immunoreactive somatomedin C in children from Morocco: a biological marker of nutritional growth retardation? *Biomed Pharmacother*, 1989; 43:59-63.

- Bouhlef E, Zaouali M, Miled A, Tabka Z, Bigard X, Shephard R.** Ramadan fasting and the GH/IGF-1 axis of trained men during submaximal exercise. *Ann Nutr Metab*, 2008; 52:261-266.
- Bouix O, Brun J, Fédou C, Micallef J, Charpiat A, Rama D, Orsetti A.** Exploration de gymnastes adolescents de classe sportive : quel suivi médical pour la croissance de la puberté ? *Science & Sports*, 1997; 12:51-65.
- Boone J, Vaeyens R, Steyaert A, Vanden Bossche L, Bourgeois J.** Physical fitness of elite Belgian soccer players by player position. *J Strength Cond Res*, 2012; 26:2051-2057.
- Bradley P, Carling C, Arder D, Roberts J, Dodds A, Di Mascio M, Paul D, Gomez-Diaz A, Peart D and Krstrup, P.** The effect of playing formation on high intensity running and technical profiles in English FA Premier League soccer matches. *J Sports Sci*, 2011; 29:821-830.
- Brandenberg G, Follenius M, Hietter B.** Feedback from meal-related peaks determines diurnal changes in cortisol responses to exercise. *J Clin Endocrinol Metab*, 1982; 54:592-596.
- Brandenberg G.** Cortisol responses to exercise and their interaction with diurnal secretory peaks. *Exerc Endocrinol*, 1985; 47-64.
- Brewer J, Davis J.** The female player. In Ekblom B. (Eds) *Football (Soccer)*. London:Blackwell Scientific, 1994; 95-99.
- Bricout V.** Effets de la gymnastique sportive sur la croissance et la maturation pubertaire des jeunes filles. *Science & sports*, 2003; 18:65-73.
- Brink M, Nederhof E, Visscher C, Schmikli S, Lemmink K.** Monitoring load, recovery, and performance in young elite soccer players. *J Strength Cond Res*, 2010; 24:597-603.
- Brillon D, Nabil N, Jacobs L.** Cholinergic but not serotonergic mediation of exercise-induced growth hormone secretion. *Endocrinol Res*, 1986; 12:137-146.
- Brismar K, Hall K.** Clinical applications of IGF-1 and its regulation. *Growth Res*, 1993; 3: 98-100.
- Brun J, Blachon C, Micallef J, Fédou C, Charpiat A, Bouix O, Orsetti A.** Protéines porteuses de somatomédines et force isométrique de préhension dans un groupe de gymnastes adolescents soumis à un entraînement intensif. *Science & Sports*, 1996; 11:157-165.
- Bruni J, Meites J.** Effects of cholinergic drugs on growth hormone release. *Life Sci*, 1978; 23:1351-1357.
- Buchheit M, Delhomel G, Ahmaidi S.** Effect of maturation status on explosive power and speed in young elite French players. 3^{ème} Congrès Sciences et Foot (Valenciennes, France), 2008.

Buchheit M, Delhomel G, Ahmaidi S. Time-motion analysis of elite young French soccer players. *Coaching & Sport Science journal*, 2008; 22:365-374.

Buchheit M, Mendez-Villanueva A, Delhomel G, Brughelli M, Ahmaidi S. Improving Repeated Sprint Ability in Young Elite Soccer Players: Repeated Shuttle Sprints Vs. Explosive Strength Training. *J Strength Cond Res*, 2010; 24:2715-2722.

Buchheit M, Mendez-Villanueva A, Simpson B and Bourdon P. Match running performance and fitness in youth soccer. *Int J Sports Med*, 2010; 31: 818-825.

C.

Cacciari E, Mazzanti L, Tassinari D, Bergamaschi R, Magnani C, Zappulla F et al. Effects of sport (football) on growth: auxological, anthropometric and hormonal aspects. *European Journal of Applied Physiology*, 1990; 61:149-158.

Cadoux-Hudson T, Few J, Imms F. The effect of exercise on the production and clearance of testosterone in well trained young men. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1985; 54:321-325.

Calbet J, Diaz Herrera P, Rodriguez L. High bone mineral density in male elite professional volleyball players. *Osteoporos Int*, 1999; 10:468-474.

Capranica L, Cama G, Fanton F, Tessitore A, Figura F. Force and power of preferred and non-preferred leg in young soccer players. *J Sports Med Phys Fitness*, 1992; 32:358-363.

Cappon J, Brasel J, Subburaman M, Cooper D. Effect of brief exercise on circulating insulin-like growth factor 1. *J Appl Physiol*, 1994; 76:2490-2496.

Carling C, Le Gall F, Reilly T, Williams A. Do anthropometric and fitness characteristics vary according to birth date distribution in elite youth academy soccer players? *Scandinavian Journal of Medicine & Science Sports*, 2009; 19:3-9.

Carling C, Le Gall F, Malina R. Body size, skeletal maturity, and functional characteristics of elite academy soccer players on entry between 1992 and 2003. *J Sports Sci*, 2012; 30:1683-1693.

Casanueva F, Villanueva L, Cabranes J, Cabezas-Cerrato J, Fernandez-Cruz A. Cholinergic mediation of growth hormone secretion elicited by arginine, clonidine, and physical exercise in man. *J Clin Endocrinol Metab*, 1984; 59:526-530.

Casanueva F, Villanueva L, Dieguez C, Cabranes J, Diaz Y, Szoke B, Scanlon M, Schally A, Fernandez-Cruz A. Atropine blockade of growth hormone (GH)-releasing hormone-

induced GH secretion elicited in man is not exerted at pituitary level. J Clin Endocrinol Metab, 1986; 62:186-191.

Casajus J. Seasonal variation in fitness variables in professional soccer players. J. Sports Med. Phys. Fitness, 2001; 41:463-469.

Castagna C, D'Ottavio S, Abt G. Activity profile of young soccer players during actual match play. J Strength Cond Res, 2003; 17:775-780.

Castagna C, Impellizzeri F, Chamari K, Carlomagno D, Rampinini E. Aerobic fitness and Yo-Yo continuous and intermittent tests performances in soccer players: A correlation study. Journal of Strength and Conditioning Research, 2006; 20:320-325.

Castagna C, Manzi V, Impellizzeri F, Weston M, Barbero J. Relationship between endurance field tests and match performance in young soccer players. J Strength Cond Res, 2010; 24:3227-3233.

Castagna C, Chaouachi M, Moussa-Chamari I, Behm DG. Stretch and sprint training reduces stretch-induced sprint performance deficits in 13- to 15-year-old youth. Eur J Appl Physiol, 2008; 104:515-522.

Chalmers T, Bloom S, Duncan G, Johnson R, Sulaiman W. The effect of somatostatin on metabolic and hormonal changes during and after exercise. Clin Endocrinol, 1979; 10:451-458.

Chamari K, Chaouachi A, Hambli M, Kaouech F, Wisløff U, Castagna C. The five-jump test for distance as a field test to assess lower limb explosive power in soccer players. J Strength Cond Res, 2008; 22:944-950.

Chamari K, Hachana Y, Ahmed Y, Galy O, Sghaïer F, Chatard J, Hue O, Wisløff U. Field and laboratory testing in young elite soccer players. Br J Sports Med, 2004; 38:191-196.

Chaouachi A, Manzi V, Wong P, Chaalali A, Chammeri K. Intensive training and sports specialization in young athletes. American Academy of Pediatrics, 2000; 106:154-157.

Chaouachi A, Chamari K, Wong K, Castagna C. Intermittent endurance and repeated sprint ability in soccer players. J Strength Cond Res, 2010; 24:2663-2669.

Chaouachi M, Chaouachi A, Chamari K, Feki Y, Amri M and Trudeau F. Effects of dominant somatotype on aerobic capacity trainability. Br J Sports Med, 2005; 39:954-959.

Charro M, Aoki M, Coutts A, Araújo R, Bacurau R. Hormonal, metabolic and perceptual responses to different resistance training systems. J Sports Med Phys Fitness, 2010; 50:229-234.

Chevenne D. Les somatidines. Ann Biol Clin, 1991; 46:69-91.

- Chicharro J, Lopez A, Hoyos J, Velasco A , Velasco G, Villa G, Villanua M, Lucia A.** Effects of an endurance cycling competition on resting serum insulin-like growth factor I (IGF-I) and its binding proteins IGFBP-1 and IGFBP-3. *Br j sports Med*, 2001; 35:303-307.
- Christensen S, Jorgensen O, Moller N, Orskou H.** Characterisation of growth hormone release in response to external heating: a comparison to exercise-induced release. *Acta Endocrinol*, 1984; 107:295-301.
- Chtara M, Chamari K, Chaouachi M, Chaouachi A, Koubaa D, Feki Y.** Effects of intra-session concurrent endurance and strength training sequence on aerobic performance and capacity. *British Journal of Sports Medicine*, 2005; 39:555-560.
- Chwalbińska-Moneta J, Kryzstofiak F, Ziemia A, Nazar K, Kaciuba-Uścilko H.** Threshold increases in plasma growth hormone in relation to plasma catecholamine and blood lactate concentration during progressive exercise in endurance-trained athletes. *Eur J Appl Physiol*, 1996; 73:117-120.
- Clark R, Morteensen D, Reifsnyder D.** Recombinant human IGFBP-3: effects on the glycemic and growth promoting activities of rhIGF-1 in the rat. *Growth Reg*, 1993; 3:50-53.
- Cohen, J.** Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd edn.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum. 1988.
- Cometti G, Maffiuletti N, Pousson M, Chatard J, Maffulli N.** Isokinetic strength and anaerobic power of elite, subelite and amateur French soccer players. *Int.J.Sports Med*, 2001; 22:45-51.
- Copeland K, Underwood L, Van Wyk J.** Induction of immunoreactive somatomedin C in human serum by growth hormone: dose-response relationships and effect on chromatographic profiles. *J Clin Endocrinol Metab*, 1980; 50:690-697.
- Copeland K, Nair K.** Acute growth hormone effects on amino acid and lipid metabolism. *J Clin Endocrinol Metab*, 1994; 78:1040-1047.
- Cornil A, De Costar A, Copinschi G, Frabckson J.** The effect of muscular exercise on the plasma cortisol level in man. *Acta Endocrinol*, 1965; 48:136.
- Costill P, Thomas R, Rebergs R, Pascoe P, Lamber T, Barr S, Fink W.** Adaptation to swimming training: influence of training volume. *Med Sci Sports Exercise*, 1991; 23:371-377.
- Costill D, Coyle E, Fink W, Lesmes G, Witzmann F.** Adaptations in skeletal muscle following strength training. *J Appl Physiol*, 1979; 46:96-99.
- Costill D, Fink W, Getchell L, Ivy J, Witzmann F.** Lipid metabolism in skeletal muscle of endurance-trained males and females. *J Appl Physiol*, 1979; 47:787-791.

- Coutts J, Lemaire C, Dubast A et al.** Intermittent versus continuous Exercise : Effet of perceptually lower Exercise in obese women. *Med Sci Sport Exerc*, 2008; 40:1546-1553.
- Coutts A, Reaburn P, Piva T and Murphy A.** Change in selected biomechanical, muscular strength, power, and endurance measures during deliberate overreaching in Rugby league players. *International Journal of Sports Medicine*, 2007; 28:116-124.
- Crist D, Peake C, Egan P, Waters D.** Body composition response to exogenous GH during training in highly conditioned adults. *J Appl Physiol*, 1988; 65:579-584.
- Cumming D, Brunsting L, Stich G, Ries A, Rebar R.** Reproductive hormone increases in response to acute exercise in men. *Med Sci Sports Exerc*, 1986; 18:369-373.
- Cumming D, Wall S, Gabraith M, Belcastro A.** Reproductive hormone responses to resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 1987; 19:234-238.
- Cumming D, Quigley M, Yen S.** Acute suppression of circulating testosterone levels by cortisol in men. *J Clin Endocrinol Metab*, 1983; 57:671-673.
- Cumming D.** The male reproductive system, exercise, and training. In: Warren WP, Constantini NW, eds. *Sports Endocrinology*. Totowa, New Jersey, Humana Press, 2000; 119-131.
- Cuneo R, Salomon F, Wiles C, Hesp R, Sonksen P.** Growth hormone treatment in growth hormone-deficient adults. I. Effects on muscle mass and strength. *J Appl Physiol*, 1991; 70:688-694.
- Cuneo R, Wallace L.** Growth hormone, insulin-like growth factors and sport. *Endocrinol Metab*, 1994; 1:3-13.
-

D.

- Dall R, Lange K, Kjaer M, Jorgensen J, Christiansen J, Orskov H, Flyvbjerg A.** No evidence of insulin-like growth factor-binding protein 3 proteolysis during a maximal exercise test in elite athletes. *J Clin Endocrinol Metab*, 2001; 86:669-674.
- Da Silva A, Papoti M, Santhiago V, Pauli J, Gobatto C.** Serum and plasma hormonal concentrations are sensitive to periods of intensity and volume of soccer training. *J Sci Sports*, 2011; 10:1016.
- Da Silva C, Bloomfield J, Bouzas Marin J.** A review of stature, body mass and maximal oxygen uptake profiles of U17, U20 and first division players in Brazilian soccer. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2008; 7:309-319.

- Davis S, Galasetti P, Wasserman D, Tate D.** Effects of gender on neuroendocrine and metabolic counterregulatory responses to exercise in normal man. *J Clin Endocrinol Metab*, 2001; 86:669-674.
- Debré F, Vincent S, Maitel B, Jacob C, Delamarch P, Delamarch A, Zouhal H.** Androgen Response to sprint Exercice in Young Men. *Int J Sports Med*, 2010;31:291-297.
- De Souza M, Acre J, Pescatello L, Scherzer H, Luciano A.** Gonadal hormones and serum quality in malerunners: a volume threshold effect of endurance training. *Int J Sports Med*, 1994; 7:383-446.
- De Vries W, Schers T, Ait Abdesselam S, Osman-Dualeh M, Maitimu I, Koppeschaar H.** Involvement of endogenous growth hormone-releasing hormone (GHRH) in the exercise-related response of growth hormone. *Int J Sport Med*, 2003; 24:208-211.
- Dehennin L.** Testostérone : l'androgène anabolisant endogène et le dépistage d'un apport exogène chez le sportif. *Science & Sports*, 1995;10:59-66.
- Deigne C, Page M, Scanlon M.** Growth hormone neuroregulation and its alteration in disease states. *Clin Endocrinol (Oxf)*, 1988; 28:109-143.
- DeLignières B, Plas J, Commandre F, Morville R, Viani J, Plas F.** Sécrétion testiculaire d'androgène après effort physique prolongé chez l'homme. *Nouv Press Med*, 1976; 5:2060-2064.
- Delitala G, Frulio T, Pacifico A, Maioli M.** Participation of cholinergic muscarinic receptors in glucagons-and arginine-mediated growth hormone secretion in man. *J Clin Endocrinol Metab*, 1982; 55:1231-1233.
- Dellal A, Keller D, Carling C, Chaouachi A, Wong D, Chamari K.** Physiologic Effects of Directional Changes in Intermittent Exercise in Soccer Players. *J Strength Cond Res*, 2010; 24:3219-3226.
- Dellal A, Chamari K, Impelizzeri F, Pintus A, Girard O, Cotte T, Keller D.** Heart rate responses during small sides-games and short intermittent running training method in elite soccer players. A comparative study. *J Strength Cond Res*, 2008; 22:1449-1457.
- Dellal A, Wong D, Moalla W and Chamari K.** Physical and technical activity to soccer players in French first league- with special reference to their playing position. *Int Sport Med Journal*, 2010;11: 278-290.
- Deuschle M, Blum W, Frystyk J, Orskov H, Schweiger U, Weber B, Körner A, Gotthardt U, Schmider J, Standhardt H, Heuser I.** Endurance training and its effect upon the activity of the GH-IGFs system in the elderly. *Int J Sports Med*, 1998; 19:250-254.
- Desvigne N.** L'hormone de croissance : un dopant ? *Science & Sports*, 2005; 20:65-73.

- Devesa J, Lima L, Tresguerres J.** Neuroendocrine control of growth hormone secretion in human. *Trends Endocrinol Metab*, 1992; 3:175-183.
- Deyssig R, Herwing F, Waener F, Walddhor T.** Effect of growth hormone treatment on hormonal parameters, body composition and strength in athletes. *Acta Endocrinol*, 1993; 128:313-318.
- Diallo O, Dore E, Douche P, Van Praagh E.** Effects of plyometric training followed by a reduced training programme on physical performance in prepubescent soccer players. *J.Sports Med.Phys.Fitness*, 2001; 41:342-348.
- Dieguez C, Casanueva F.** Influence of metabolic substrates and obesity on growth hormone secretion. *Trends Endocrinol Metab*, 1995; 6:55-59.
- Di Luigi L, Guidetti L, Nordio M, Baldari C, Romanelli F.** Acute effect of physical exercise on serum insulin-like Growth Factor-Binding protein 2 and 3 in healthy men: role of exercise linked Growth Hormone Secretion. *Int J Sports Med*, 2001; 22:103–110.
- Di Salvo V and Pigozzi F.** Physical training of football soccer players based on their positional roles in the team. Effects of performance-related factors. *J Sports Med Phys Fitness*, 1998; 38: 294-297.
- Di Salvo V, Baron R, Tschan H, Calderon Montero F, Bachl N, Pigozzi F.** Performance characteristics according to playing position in elite soccer. *Int J Sports Med*, 2007; 28:222-227.
- Di Salvo V, Benito P, Calderón F, Di Salvo M, Pigozzi F.** Activity profile of elite goalkeepers during football match-play. *J Sports Med Phys Fitness*, 2008; 48:443-446.
- Di Salvo V, Gregson W, Atkinson G, Tordoff P, Drust B.** Analysis of high intensity activity in Premier League soccer. *Int J Sports Med*, 2009; 30:205-212.
- Dore E, Bedu M, França M, Van Praagh E.** Anaerobic cycling performance characteristics in prepubescent and young adult females. *European Journal of Applied physiology*, 2001; 84:476-481.
- Duclos M, Corcuff J, Arsac L, Moreau-Gaudry F, Rashedi M, Fougere V, Manier G.** Corticotrophic axis sensitivity during recovery of muscular axis in endurance-trained athletes. *Clin Endocrinol*, 1998; 48:493-501.
- Duclos M, Corcuff J, Rashedi M, Fougere V, Manier G.** Trained versus untrained of gonadotropic axis in endurance trained athletes during and after exercise? *Eur J Appl Physiol*, 1996; 73:427-433.
- Duclos M.** Impact of muscular exercise on endocrine functions. *Ann d'Endocrinol*, 2001; 62: 19-32.

- Duclos M.** Retentissement hormonal du sport chez la jeune athlète. Arch Pediatr, 2007 ; 14: 534-536.
- Ducy Patricia.** Contrôle génétique de la squelettogénèse. Médecine/Sciences, 2001 ; 17:1242-1251.
- Dufty AM.** Testosterone and survival: a cost of aggressiveness? Horm and Behavior, 1989; 23:185-193.
- Dupont G, Akakpo K, Berthoin S.** The effect of in-season, high-intensity interval training in soccer players. J Strength Cond Res, 2004; 18:584-589.
- Durnin J, Rahaman M.** The assessment of the amount of fat in the human body from measurements of skinfold thickness. Br J Nutr, 1967; 21:681-689.
- Durnin J and Wormersley J.** Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. Bri J Nutr, 1974; 32:77–97.
- During J and Webster C.** A new method of assessing fatness and desirable weight for use in the Armed Service Army department, Ministry of Defence, 1985.
-

E.

- Ehrnborg C, Lange K, Dall R, Christansen J, Lundberg P, Bax R, Boroujerdi M, Bengetsson B, Healey M, Pentecost C, Longobardi S, Napoli R, Rosen T.** The growth hormone/insulin –like growth factor-I axis hormones and bone markers in elite athletes in response to a maximum exercise test. J Clin Endocrinol Metab, 2003; 88:349-401.
- Eklblom B.** Applied physiology of soccer. Sports Med, 1986; 3:50-60.
- Eliakim A, Brasel J, Mohan S, Cooper D.** Increased physical activity and the growth hormone-insulin-like factor-1 axis in adolescent males. Am J Physiol, 1998; 275:308-314.
- Eliakim A, Brazel J, Mohan S, Barstow TJ, Berman N, Cooper D.** Physical fitness, endurance training, and the GH/IGF-I system in adolescent males females. . J Clin Endocrinol Metab, 1996; 81:3986-3992.
- Eliakim A, Nemet D, Bar-Sela S, Higer Y, Falk B.** Changes in circulating IGF-A and their correlation with self-assessment and fitness among elite athletes. Int J Sports Med, 2002; 23:600-693.
- Eliakim A, Portal S, Zadik Z, Rabinowitz J, Adler-Portal D, Cooper D, Zaldivar F, Nemet D.** The effect of a volleyball practice on anabolic hormones and inflammatory

markers in elite male and female adolescent players. *J Strength Cond Res*, 2009; 23:1553-1559.

Eliakim A, Scheett T, Newcomb R, Mohan S, Cooper. Fitness, Training and the growth hormone–insulin-like growth factor I axis in perpubertal girls. *J Clin Endocrinol Metab*, 2001; 86:2797-2802.

Eliakim A, Nemet D, Jürimäe J, Hills A, Jürimäe T. Cytokines, Growth Mediators and Physical Activity in Children during Puberty. *Med Sport Sci. Basel, Karger*, 2010; 55:128–140.

Eloumi M, Ben Ounis O, Tabka Z, Van Praagh E, Michaux O, Lac G. Psychoendocrine and physical performance responses in male Tunisian rugby players during an international competitive season. *Aggress Behav*, 2008; 34:623-632.

F.

Faina M, Gallouzi C, Lupo S. Definition of physiological profile of the soccer players. In Reilly T, Lees A, Davids K et al. (Eds.) *Science and Football*, Londres: E and FN Spon, 1988; 158-163.

Farell P, Garthwaite T, Gustafson A. Plasma adrenocorticotropin and cortisol responses to submaximal and exhaustive exercise. *J Appl Physiol*, 1983; 55:1441-1444.

Felipe F, Gasanueva M, Carlos Dieguez M. Interaction between body composition, leptin and growth hormone status. *Baillière's Clin Endocrinol Metab*, 1998; 12:297-314.

Fellman N, Bedu M, Giry J, Pharmakis-Amadiou M, Bezou M, Barlet J, Coudert J. Hormonal, fluid, and electrolyte changes during a 72-h recovery from a 24-h endurance run. *Int J Sports Med*, 1989; 10:406-412.

Felsing N, Brasel J, Cooper D. Effect of low and high intensity exercise on circulating growth hormone in men. *J Clin Endocrinol Metab*, 1992; 75:157-162.

Fetiz D, Ewing M. Psychological characteristics of elite young athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 1987; 19:S98-S105.

Ferrari Bravo D, Impellizzeri F, Rampinini E, Castagna C, Bishop D, Wisloff U. Sprint vs. interval training in football. *Int J Sports Med*, 2008; 29:668-674.

Few J. Effect of exercise on the secretion and metabolism of cortisol in man. *J Endocrinol*, 1974; 62:341-353.

- Fiet J, Passa Ph, Cuechot J, Gourmel B, Vilette J, Cathlineau G.** Interet du dosage du cortisol dans la salive. *Nouv Presse Med*, 1981; 10:2664.
- Filaire E, Bernain X, Sangol M, Lac G.** Preliminary results on mood state, salivary testosterone/Cortisol ratio and team performance in a professional soccer team. *Eur J Appl Physiol*, 2001; 86:179-184.
- Filaire E, Duché P, Lac G.** Effects of training for two ball games on the saliva response of adrenocortical hormone to exercise in sportswomen. *Eur J Appl Physiol*, 1998; 77:452-456.
- Filaire E, Jouanel P, Colombier M, Bégue R, Lac G.** Effects of 16 weeks of training prior to a major competition on hormonal and biochemical parameters in young elite gymnastes. *J Pediatr Endocrinol Metab*, 2003; 16:741-750.
- Florini J.** Hormonal control of muscle growth. *Muscle Nerve*, 1987; 10:577-598.
- Florida-James G, Reilly T.** The physiological demands of Gaelic football. *Br. J. Sports Med*, 1995; 29:41-45.
- Flynn M, Pizza F, Boone J, Anders F, Michaud T, Rodriguez Zayas J.** Indices of training stress during competitive running and swimming seasons. *Int J Sports Med*, 1994; 15:21-26.
- Ford P, Carling C, Garces M, Marques M, Miguel C, Farrant A, Stenling A, Moreno J, Le Gall F, Holmstron S, Salmela J, Williams M.** The developmental activities of elite soccer players aged under-16 years from Brazil, England, France, Ghana, Mexico, Portugal and Sweden. *J Sports Sci*, 2012; 30:1653-1663.
- Foster C, Florhaug J, Franklin J, Gottschall L, Horvatin L, Parker S, Doleshal P, Dodge C.** A new approach to monitoring exercise training. *Journal of strength and conditioning Research*, 2001; 15:109-115.
- Francisco J, Martín L, Gallego A.** Deficits of accounting in the valuation of rights to exploit the performance of professional players in football clubs. A case study. *Journal of Management Control*, 2011; 22:335-357.
- Franks A, Williams A, Reilly T, Nevill A.** Talent identification in elite youth soccer players: Physical and physiological characteristics. *Journal of Sports Sciences*, 1999; 17, 812.
- Fry A, Kraemer W, Ramsey L.** Pituitary-adrenal-gonadal responses to high-intensity resistance exercise overtraining. *J Appl Physiol*, 1998; 85:2352-2359.
- Fry A, Kraemer W.** Resistance exercise overtraining and overreaching. Neuroendocrine responses. *Sports Med*, 1997; 23:106-129.
- Frystyk J, Skjaerbaek C, Dinesen B, Orkov H.** Free insulin-like growth factors (IGF-I and IGF-II) in human serum. *FEBS Lett*, 1994; 38:158-191.

G.

- Gaitanos G, Williams C, Boobis L, Brooks S.** Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol*, 1993; 75:712-719.
- Galbo H.** Hormonal and metabolic adaptation to exercise. New York: Georg Thieme Verlag, 1983.
- Gamblin L, Winterbottom W.** Tout le Football, 1952.
- Garganta J, Maia J, Silva R et al.** A comparison study of explosive leg strength in elite and non elite young soccer players. *J Sports Sci*, 1992; 10:157.
- Gatterer H, Faulhaber M, Patterson C.** Real time VO₂ measurements during soccer match-play. *J Sports Med Phys Fitness*, 2010; 50:109-110.
- Gastmann U, Dimeo F, Huonker M, Huonker K, Bocker J, Steinacker J, Petersen K, Wieland H, Keul J, Lahmann M.** Ultra-triathlon-related blood-chemical and endocrinological responses in nine athletes. *J Sports Med Phys Fitness*, 1998; 38:18-23.
- Georgopoulos N, Roupas N, Theodoropoulou A, Tsekouras A, Vagenakis AG, Markou KB.** The influence of intensive physical training on growth and pubertal development in athletes. *Ann N Y Acad Sci*, 2010; 1205:39-44.
- Gerish G, Ruttemoiller E, Weber K.** Sportsmedical measurements performance in soccer. In Reilly T, Lees A, Davids K and Murphy WJ, *Science and football* (London/New York, 1988; 60-67.
- Gil S, Ruiz F, Irazusta A, Gil J, Irazusta J.** Selection of young soccer players in terms of anthropometric and physiological factors. *J Sports Med Phys Fitness*, 2007a; 47:25-32.
- Gil S, Ruiz F, Irazusta A, Gil J, Irazusta J.** Physiological and anthropometric characteristics of young soccer players according to their playing position: Relevance for the selection process. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2007b, 21:438-445
- Giustina A, Veldhuis J.** Pathophysiology of the neuroregulation of growth hormone secretion in experimental animals and the human. *Endocr Rev*, 1998; 19:717-797.
- Gordon S, Kraemer W, Vos N, Lynch J, Knuttgen H.** The effect of acid-base balance on growth hormone response to acute high intensity exercise. *J Appl Physiol*, 1994; 76:821-829.
- Gorostiaga E, Izquierdo M, Iribarren J, Gonzales J, Ibanez J.** Strength training effects on physical performance and serum hormones in young soccer players. *Eur J Appl Physiol*, 2004; 91:698-707.

- Grandys M, Majerczak J, Duda K, Zapart-Bukowska J, Kulpa J, Zoladz J.** Endurance training of moderate intensity increases testosterone concentration in young, healthy men. *Int J Sports Med*, 2009; 30:489-495.
- Gravina L, Gil S, Ruiz F, Zubero J, Gil J, Irazusta J.** Anthropometric and physiological differences between first team and reserve soccer players aged 10–14 years at the beginning and end of the season. *J Strength Cond Res*, 2008; 22:1308–1314.
- Gray A, Jenkins D.** Match analysis and the physiological demands of Australian football. *Sports Med*, 2010; 40:347-360.
- Guezennec C, Ferre P, Serrurier B, Merino D, Pesquies P.** Effects of prolonged physical exercise and fasting upon plasma testosterone level in rats. *Eur J Appl Physiol*, 1982; 52:300-304.
- Guezennec C, Leger L, Lhoste F, Aymonod M, Pesquies P.** Hormone and Metabolite response to Weight-Lifting Training Sessions. *Int J Sports Med*, 1986; 7:100-105.
- Guezennec C, Serrurier B, Merino D, Lienhard F, Bigard X.** Atrophie musculaire induite par l'immobilisation et l'hypokinésie : Influence hormonales et applications thérapeutiques. *Rev Fr Endocrinol Clin*, 1991; 32:149-163.
- Guinot M.** Thèse de doctorat en STAPS .Suivi endocrinien de sportifs de haut niveau : axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien et somatotrope et remodelage osseux, 2006.
- Guistina A, Veldhuis J.** Pathophysiological basis of the neuroregulation of the somatotrophic (GH) axis in experimental animals and the human. *Endocr Rev*, 1998; 19:717-797.
-

H.

- Hackney A, Szczepanowska E, Viru A.** Basal testicular testosterone production in endurance-trained men is suppressed. *Eur J Appl Physiol*, 2003; 89:198-201.
- Hagberg J, Seals D, Yerg J, Gavin J, Gingerich R, Premachandra B, Holloszy J.** Metabolic responses to exercise in young and old athletes and sedentary men. *J Appl Physiol*, 1988; 65:900-908.
- Häkkinen K, Pakarinen A, Alen M, Kauhanen H, Komi P.** Relationship between training volume, physical performance capacity, and serum hormone concentrations during prolonged training in elite weightlifters. *Int J Sports Med*, 1987; 8:61-65.

- Häkkinen K, Pakarinen A, Newton R, Kraemer W.** Acute hormone responses to heavy resistance lower and upper extremity exercise in young versus old men. *Eur J Appl Physiol*, 1998; 77:312-319.
- Häkkinen K, Pakarinen A.** Acute hormonal responses to heavy resistance exercise in men and women at different ages. *Int J Sports Med*, 1995; 16:507-513.
- Häkkinen K, Pakarinen A.** Acute hormonal responses to two different fatiguing heavy-resistance protocols in male athletes. *J Appl Physiol*, 1993; 74:882-887.
- Hamon G, Hunt T, Spencer E.** In vivo effects of systemic IGF-1 alone complexed with IGFBP-3 on corticosteroid suppressed wounds. *Growth Reg*, 1993; 3:53-56.
- Hansen L, Bangsbo J, Wiskott T, Klausen K.** Development of muscle strength in relation to training level and testosterone in young male soccer players. *J Appl Physiol*, 1999; 87:1141-1147.
- Hartley L, Mason J, Hogan R, Jones L, Kotchen T, Mougey E, Wherry F, Pennington R, Ricketts P.** Multiple hormonal responses to graded exercise in relation to physical training. *J Appl Physiol*, 1972; 33:602-606.
- Haugen T, Tønnessen E, Seiler S.** Anaerobic Performance Testing of Professional Soccer Players 1995-2010. *Int J Sports Physiol Perform*, 2012 Aug 6. [Epub ahead of print]
- Hawkins R.** The official FA guide to success on and off the pitch: Fitness for football. The FA learning (Fédération anglaise de football), Hodder Arnold eds, 2004.
- Helgerud J, Engen L, Wisloff U, Hoff J.** Aerobic endurance training improves soccer performance. *Med Sci Sports Exerc*, 2001; 33:1925-1931.
- Helgerud J, Hoff J, Østerås.** Maximal strength-training effects on force-velocity and force-power relationships explain increases in aerobic performance in humans. *Eur J Appl Physiol*, 2002; 88:255-263.
- Helgerud J, Rodas G, Kemi O, Hoff J.** Strength and endurance in elite football players. *Int J Sports Med*, 2011; 32:677-682.
- Hencken C and White C.** Anthropometric assessment of Premiership soccer players in relation to playing position. *European Journal of Sport Science*, 2006; 6:205-211.
- Heuser I, Wark H, Keul J, Holsober F.** Hypothalamic-pituitary-adrenal axis function in elderly endurance athletes. *J Clin Endocrinol Metab*, 1991; 73:485-488.
- Hermansen L, Wachtlova M.** Capillary density of skeletal muscle in well-trained and untrained men. *J Appl Physiol*, 1971; 30:860-863.

- Hickson R, Maone J.** Exercise and inhibition of glucocorticoid-induced muscle atrophy. In: Exercise and Sport Sciences Reviews. Baltimore, MD: Williams & Wilkins, 1993; 21:135-167.
- Hill-Haas S, Coutts A, Rowsell G, Dawson B.** Variability of acute physiological responses and performance profiles of youth soccer players in small-sided games. J Sci Med Sport, 2008; 11:487-490.
- Holt R, Webb E, Pentecost C, Sonksen P.** Aging and physical fitness are more important than obesity in determining exercise-induced generation of GH. J Clin Endocrinol Metab, 2001; 86:5715–5720.
- Hoff J, Helgerud J.** Maximal strength training enhances running economy and aerobic endurance performance. Scand J Med Sci Sports, 2002; 12:288-295.
- Hoff J, Wisloff U, Engen L, Kemi O, Helgerud J.** Soccer specific aerobic endurance training. Br J Sports Med, 2002; 36:218-221.
- Hoff J.** Training and testing physical capacities for elite soccer players. Journal of Sports Sciences, 2005; 23:573 – 582.
- Holloszy J, Oscai L, Don I, Molé P.** Mitochondrial citric acid cycle and related enzymes: adaptive response to exercise. Biochem Biophys Res Commun, 1970; 40:1368-1373.
- Holloszy J and Coyle E.** Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. Journal of Applied Physiology, 1984; 56:831-838.
- Hoogeveen A and Zonderland M.** Relationships between testosterone, cortisol and performance in professional cyclists. Int J Sports Med, 1996; 17:423-428.
- Hopkins W.** Measures of reliability in sports medicine and science. Sports Med, 2000; 30:1-15.
- Hosick P, McMurray R, Hackney A, Battaglini C, Combs T, Harrell J.** Differences in the GH-IGF-I axis in children of different weight and fitness status. Growth Horm IGF Res, 2012; 22:87-91.
-

I.

- Iaia F, Rampinini E, Bangsbo J.** High-intensity training in football. Int J Sports Physiol Perform, 2009; 4:291-306.
- Impellizzeri F, Rampinini E, Coutts A, Sassi A and Marcora M.** The Use of RPE-Based Training Load in Soccer. Med Sci Sport Exerc, 2004; 36:1042-1047.

Impellizzeri F, Marcora S, Castagna C, Reilly T, Sassi A, Iaia F, Rampinini E. Physiological and performance effects of generic versus specific aerobic training in soccer players. *Int J Sports Med*, 2006; 27:483-492.

Impellizzeri F, Rampinini E, Marcora S. Physiological assessment of aerobic training in soccer. *J Sports Sci*, 2005; 23:583-592.

Isley W, Underwood L, Clemmons D. Dietary components that regulate serum somatomedin-C concentrations in humans. *J Clin Invest*, 1983; 71:175-182.

J.

Jahreis G, Kauf E, Fröhner G, Schmidt H. Influence of intensive exercise on insulin-like growth factor 1, thyroid and steroid hormones in female gymnasts. *Growth Regul*, 1991; 1:95-99.

Jammes Y, Fornaris M, Guillot C, Grimaud C. Pattern of the ventilatory response to transient hypoxia in man: differences from transient hypercapnic test. *Arch IntPhysiolBiochim*, 1979; 87:229-243.

Jankovic S, Heimer N and Matkovic BR. Physiological profile of prospective soccer players. In: Reilly T, Clarys J and Stibbe A, editors. *Science and football II*. London: E & FN Spon; 1993; 295–297.

Jankovic S, Matkovic B, Matkovic B. Functional abilities and process of selection in soccer. Communication to the 9th European Congress on Sports Medicine, 1997; Porto, Portugal, 23; 26 September.

Jastrzębski Z, Rompa P, Szutowicz M, Radzimiński L. Effects of applied training loads on the aerobic capacity of young soccer players during a soccer season. *J Strength Cond Res*, 2012.

Jensen J, Oftebro H, Breigan B, Johnson A, Ohlin K, Meen H, Stromme B, Dahl H. Comparison of changes in testosterone concentrations after strength and endurance exercise in well trained men. *Eur J Appl Physiol*, 1991; 63:467-471.

Johnson M, Everitt B. *Essential production*. London: Backwell Scientific Publications, 1984; 51:147-149.

Jorgensen J, Pedersen S, Thusen L, Jorgensen J, Ingemann-Hansen T, Skakkebaek N, Christiansen J. Beneficial effects of growth hormone treatment in GH-deficient adults. *Lancet*, 1989; 1:1221-1225.

Jovanovic M, Sporis G, Omcen D, Fiorentini F. Effects of speed, agility, quickness training method on power performance in elite soccer players. *J Strength Cond Res*, 2011; 25:1285-1292.

Jürimäe T, Karelson K, Smirnova T, Viru A. The effects of a single –circuit weight-training session on the bloodbiochemistry of untrained university students. *Eur J Appl Physiol*, 1990; 61:344-348.

Juricskay Z and Mezey M. Effet d'une formation régulière sur les paramètres anthropométriques et les stéroïdes urinaires dans l'enfance. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1994; 68:367-372.

Juul A, Dalgaard P, Werner F. Serum levels of insulin-like growth factor (IGF)-binding protein-3 (IGFBP-3) in healthy infants, children and adolescents: the relation to IGF-I, IGF-II, IGFBP-1, IGFBP-2, age, sex, body mass index, and pubertal maturation. *J Clin Endocrinol Metab*, 1995; 80:2534-2542.

K.

Kanaley J, Weltman J, Veidhuis J, Rogol A, Hartman M, Weltman A. Human growth hormoneresponse to repeated bouts of aerobic exercise. *J Appl Physiol*, 1997; 83:1756-1761.

Keizer H. Neuroendocrine aspects of overtraining. In *Overtraining in Sport*, ed.Kreider RB, Fry AC, O'Toole ML, Champaign IL: Human Kinetics.1998; 145:167.

Kelly P, Eisman J, Stuart M, Pocock N, Sambrook P, Gwinn T. Somatomedin-C, physical fitness, andbone density. *J Clin Endocrinol Metab*, 1990; 70:718-723.

Kelly P, Gijiane M, Postel-Vinay M, Edery M. The prolactin/growth hormone receptor family. *Endocr Rev*, 1991; 12:235-251.

Kelly D, Drust B. The effect of pitch dimensions on heart rate responses and technical demands of small-sided soccer games in elite players. *J Sci Med Sport*, 2009; 12:475-479.

Kindermann W, Schnabel A, Schmitt W, Biro G, Cassens J, Weber F. Catecholamines, growth hormone,cortisol, insulin, and sex hormones in anaerobic and aerobic exercise. *Eur J Appl Physiol*, 1982; 49:389-399.

Kirschbaum C, Hellhammer D. Salivary cortisol in psychobiological researches: an overview. *Neuropsychobiology*, 1989; 22:150-169.

Kirwan J, Costill D, Fink W, Mitchell J, Houmard J, Flynn M. Changes in selected blood measuresduring repeated days of intense training and carbohydrate control. *Int J Sports Med*, 1990; 11:362-366.

- Kjaer M, Bangsbo J, Lortie G, Galbo H.** Hormonal response to exercise in humans: influence of hypoxia and physical training. *Am J Physiol*, 1988; 245:197-203.
- Koistinen H, Koistinen R, Selenius L, Ylikorkala O, Seppala M.** Effect of marathon run on serum IGF-I and IGF-binding protein 1 and 3 levels. *J Appl Physiol*, 1996; 80:760-764.
- Kollath E, Quade K.** Measurement of sprinting speed of professional and amateur soccer players. In Reilly T, Clarys J, Stibbe L (Eds). *Science and Football II*, Londres: E and FN Spon, 1993:31-36.
- Koziris L, Hickson R, Groseth R, Chistie J, Goldflies D, Unterman T.** Serum levels of total and free IGF-I and IGFBP-3 are increased and maintained in on-term training. *J Appl Physiol*, 1999; 86:1436-1442.
- Kozlowski S, Chwalbiska-Moneta J, Vigas M, Nazar K.** Greater serum GH responses to arm than leg exercise performed at equivalent oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol*, 1983; 52:131-135.
- Kraemer W, Ratamess N.** Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med*, 2005; 35:339-361.
- Kraemer R, Durand R, Acevedo E, Johnson L, Kraemer G, Hebert E and Castracane V.** Rigorous running increases growth hormone and insulin-like growth factor-1 without altering ghrelin. *Experimental Biology and Medicine*, 2004; 229:240-246.
- Kraemer W, Aguilara B, Terada M, Newton R, Lynch J, Rosendal G, McBride J, Gordon S, Häkkinen K.** Response of IGF-I to endogenous increases in growth hormone after heavy-resistance exercise. *J Appl Physiol*, 1995a; 79:1310-1315.
- Kraemer W, Fleck S, Dziados J, Harman E, Marchitelli L, Friedl K, Harman E, Maresh C, Fry A.** Endogenous anabolic hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise in males and females. *Int J Sports Med* 1991; 12:228-235.
- Kraemer W, French D, Paxton N, Hakkinen K, Volek J, Sebastianelli W, et al.** Changes in exercise performance and hormonal concentrations over a big ten soccer season in starters and non starters. *J Strength Cond Res*, 2004; 18:121-128.
- Kraemer W, Fry A, Warren B, Stone M, Fleck S, Kaerney J, Conroy B, Maresh C, Weseman C, Triplet N, Gordon S.** Acute hormonal responses in elite junior weightlifters. *Int J Sports Med*, 1992; 13:103-109.
- Kraemer W, Häkkinen K, Newton R, McCormick M, Nindl B, Volek J, Gotsshalk L, Fleck S, Campbell W, Gordon S, Farrell P, Evans WJ.** Acute hormonal responses to heavy resistance exercise in younger and older men. *Eur J Appl Physiol*, 1998; 77:206-211.

Kraemer W, Häkkinen K, Newton R, Nindl B, Volek J, McCormick M, Gotshalk L, Gordon S, Fleck S, Campbell W, Putukian M, Evans W. Effects of heavy resistance training Acute hormonal responses to heavy-resistance training on hormonal response patterns in younger vs older men. *J Appl Physiol*, 1999; 87:982-992.

Kraemer W, Marchitelli L, Gordon S, Harman E, Dziados J, Mello R, Frykman P, Frykman P, McCurry D, fleck S. Hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise protocols. *J Appl Physiol*, 1990; 69:1441-1450.

Kraemer W, Patton J, Gordon S, Harman E, Deschenes M, Reynolds K, Newton R, Triplett T, Dziados J. Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. *J Appl Physiol*, 1995b; 83:976-989.

Kraemer W. Endocrines responses to resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 1988; 20:S152-S157.

Krahl H, Michaelis U, Pieper H, Quack G, Montag M. Stimulation of bone growth through sports. A radiologic investigation of the upper extremities in professional tennis players. *Am J Sports Med*, 1994; 22:751-757.

Krustrup P, Mohr M, Amstrup T et al. The Yo-Yo intermittent recovery test: physiological response, reliability, and validity. *Med Sci Sports Exerc*, 2003; 35:697-705.

Kujala V, Alen M, Huhtaniemi I. Gonadotrophin releasing hormone and human chorionic gonadotrophin tests reveal that both hypothalamic and testicular endocrine functions are suppressed during acute prolonged physical exercise. *Clinical Endocrinology*, 1990; 33:219-225.

L.

Lac G, Berthon P. Changes in cortisol and testosterone levels and T/C ratio during an endurance competition and recovery. *J Sports Med Phys Fitness*, 2000; 87:183-188.

Lac G, Chamoux A. Un référentiel du rythme circadien du cortisol salivaire chez l'homme au travail. *Arch Mal Prof*, 2000; 61:469-473.

Lac G, Lac N, Robert A. Steroid assays in saliva: a method to detect plasmatic contaminations. *Arch Int Phys Bioch Biophy*, 1993; 101:275-262.

Lac G, Marquet P, Chassin A, Galen F. Dexamethasone in resting and exercising men. II. Effects on adrenocortical hormones. *J Appl Physiol*, 1999; 87:183-188.

- Lac G, Pantelidis D, Robert A.** Salivary cortisol response to a 30 mn submaximal test adjusted to a constant heartrate. *J Sports Med Phys Fitness*, 1997; 37:56-60.
- Lac G, Passelergue P, Robert A, Rouillon J, Sesboüe B.** Influence du type de pratique sportive sur les taux detestostérone. *Science & Sports*, 1995 ; 10 :157-158.
- Lacour J.** Aspects endocriniens de l'exercice musculaire. *Moticté Humaine* ,1983 ; 1:65-75.
- Lago-Peñas C, Casais L, Dellal A, Rey E, Domínguez E.** Anthropometric and physiological characteristics of young soccer players according to their playing positions: relevance for competition success. *J Strength Cond Res*, 2011; 25:3358-3367.
- Lanzi R, Tannenbaum G.** Time-dependent reduction and potentiation of growth hormone (GH) releasing factorinduced by exogenous GH: a role for somatostatin. *Endocrinology*, 1992; 130:1822-1828.
- Lassarre C, Girard F, Durand J, Raynaud J.** Kinetics of human growth hormone during submaximal exercise. *J Appl Physiol*, 1974; 37:826-830.
- Leatt P, Shepard R, Plyley M.** Specific muscular development in under-18 soccer players.*J. Sports Sci*, 1987; 5:165-175.
- le Gall F, Carling C, Williams M, Reilly T.**Anthropometric and fitness characteristics of international, professional and amateur male graduate soccer players from an elite youth academy. *J Sci Med Sport*, 2010;13:90-95.
- Le Gall F.** Tests et exercices en football : suivi médical et physiologique. Editions Vigot 2002.
- Le Gall F, Beillot J and Rochcongar P.**The improvement in maximal anaerobic power of soccer players during growth. *Science & Sports*, 2002; 17:177-188.
- Legros P et le groupe «surentraînement».** Le surentraînement. *Science & Sports*, 1992; 7:51-57.
- Lehmann M; Foster C, Keul J.** Overtraining in endurance athletes: a brief review. *Med Sci Sports Exerc*, 1993; 25:854-856.
- Leite R, Prestes J, Rosa C, De Salles B, Maior A, Miranda H, Simão R.** Acute effect of resistance training volume on hormonal responses in trained men.*J Sports Med Phys Fitness*, 2011;51:322-328.
- Leone M, Larivière G.** Caractéristiques anthropométriques et biomotrices d'adolescents athlètes élités de disciplines sportives différentes. *Science & sports*, 1998; 13:26-33.
- Lewis U, Sinha Y, Haro L.**Variant forms and fragments of human growth hormone in serum. *Act Paediatr*, 1994; 399:S29-S31.

Lewitt M, Denner G, Cooney G, Baxter R. IGFBP-1 modulates blood glucose levels. *Endocrinology*, 1991; 129:2254-2256.

Luger A, Deuster P, Kyle S, Galluci W, Montgomery L, Gold P, Lynn Loriaux D, Chrousos G. Acute hypothalamic-pituitary-adrenal axis responses to the stress of treadmill exercise. *New Engl J Med*, 1987; 316:1309-1315.

Luger A, Watschinger B, Duester P, Svoboda T, Clodi M, Chrousos G. Plasma growth hormone and prolactin responses to graded levels of acute exercise and to a lactate infusion. *Neuroendocrinology*, 1992; 56:112-113.

Lutoslawaska G, Obminski Z, Krogulski A, Snedecki W. Plasma cortisol and testosterone following 19-km and 42-km races. *J Sports Med Phys Fitness*, 1991; 31:538-542.

M.

Maas H, De Vries W, Maitimu I, Bol E, Bowers C, Koppeschaar H. Growth hormone responses during strenuous exercise: the role of GH-releasing hormone and GH-releasing peptide-2. *Med Sci Sports Exerc*, 2000; 32:1226-1232.

Mackinnon L, Hooper S, Jones S, Gordon R, Bachmann W. Hormonal, immunological, and hematological responses to intensified training in elite swimmers. *Med Sci Sports Exerc*, 1997; 29:1637-1654.

Mackelvie K, Khan K, McKay H. Is there a critical period for bone response to weight-bearing exercise in children and adolescents? A systematic review. *Br J Sports Med*, 2002; 36:250-257.

Maestu J, Jürimäe J, Jürimäe T. Hormonal reactions during heavy training stress and following tapering in highly trained male rowers. *Horm Metab Res*, 2003; 35:109-113.

Maimoun L, Galy O, Manetta J. Competitive season of triathlon does not alter bone metabolism and bone mineral status in male triathletes. *Int J Sports Med*, 2004; 25:230-234.

Malina R, Ribeiro B, Aroso J, Cumming S. Characteristics of youth soccer players aged 13-15 years classified by skill level. *Br J Sports Med*, 2007; 41:290-295.

Malina R, Bouchard C, Bar-Or O. Growth, maturation and physical activity, 2nd ed. Champaign, IL: Human Kinetics, 2004.

Malina R, Cumming S, Kontos A. Maturity-associated variation in sport-specific skills of youth soccer players aged 13-15 years. *J Sport Sci*, 2005; 23:515-522.

- Malina R, Eisenmann J, Cumming S.** Maturity-associated variation in the growth and functional capacities of elite youth football (soccer) players 13–15 years. *Eur J Appl Physiol*, 2004; 91:555–562.
- Malina R, Pena Reyes M, Eisenmann J, Horta L, Rodrigues J, Miller R.** Height, mass and skeletal maturity of elite Portuguese soccer players aged 11–16 years. *J Sports Sci*, 2000; 18:685–893.
- Mallo J, Navarro E.** Physical load imposed on soccer players during small-sided training games. *J Sports Med Phys Fitness*, 2008; 48:166-171.
- Manetta J, Brun J, Maimoun L, Callis A, Préfaut C, Mercier J.** The effects of training on the GH/IGF-I axis during exercise in middle-aged men: relation to glucose homeostasis. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2002; 283:929-936.
- Manetta J, Brun J, Maimoun L, Fedou C, Préfaut C, Mercier J.** The effects of intensive training on insulin-like growth factor I (IGF-I) and IGF binding proteins 1 and 3 in competitive cyclists: relationships with glucose disposal. *J Sports Sci*, 2003; 21:147-154.
- Markovic G, Mikulic P.** Discriminative ability of the yo-yo intermittent recovery test (level 1) in prospective young soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2011; 25 :2931-2934.
- Martin-Krumm C et Sarrazin P,** « Théorie des styles explicatifs et performance sportive : fondements théoriques, données empiriques et perspectives », *Movement & Sport Sciences*, 2004 ; 9-43.
- Mason J, Hartley L, Kotchen T, Mougey E, Ricketts P, Jones L.** Plasma cortisol and norepinephrine response in anticipation of muscular exercise. *Psycho Med*, 1973; 35:406-414.
- Matina RM, Rogol AD.** Sport training and the growth and pubertal maturation of young athletes. *Pediatr Endocrinol Rev*, 2011; 9:441-455.
- Mauras N, Rogel A, Haymond M, Veldhuis J.** Sex steroids, growth hormone, insulin-like growth factor-1: neuroendocrine and metabolic regulation in puberty. *Horm Res*, 1996; 45:74-80.
- McCall G, Byrnes W, Fleck S, Dickinson A, Kraemer W.** Acute and chronic hormonal responses to resistance training designed to promote muscle hypertrophy. *Can J Appl Physiol*, 1999; 24:96-107.
- McMillan K, Helgerud J, Macdonald R, Hoff J.** Physiological adaptations to soccer specific endurance training in professional youth soccer players. *Br J Sports Med*, 2005; 39:273-277.

- Meckel Y, Nemet D, Bar-Sela S, Radom-Aizik S, Cooper D, Sagiv M, Eliakim A.** Hormonal and inflammatory responses to different types of sprint interval training, 2011; 25:2161-2169.
- Meeusen R, Piacentini MF, Busschaert B, Buyse L, De Schutter G, Stray-Gundersen J.** Hormonal responses in athletes: the use of a two bout exercise protocol to detect subtle differences in (over) training status. *Eur J Appl Physiol*, 2004; 91:140-146.
- Mejri S, Bchir F, Koubaa D, B Slama C.** Réponses de GH, IGF-1 et IGFBP3 à un exercice submaximal: différences entre sujets entraînés et sédentaires. *Sci Sports*, 2004; 19: 80-85.
- Mejri S, Bchir F, Ben Rayana M, Ben Hamida J, Ben Slama C.** Effect of training on GH and IGF-1 responses to a submaximal exercise in football players. *Eur J Appl Physiol*, 2005; 95:496-503.
- Mendez-Villanueva A, Buchheit M, Simpson B, Bourdon P.** Match Play Intensity Distribution in Youth Soccer. *Int J Sports Med*. 2012 Sep 7[Epub ahead of print]
- Mercier B, Mercier J, Granier P, Le Gallais D, Prefaut C.** Maximal anaerobic power : relationship to anthropometric characteristics during growth. *International Journal of Sports Medicine*, 1992; 13:21-26.
- Minetto M, Lanfranco F, Tibaudi A, Baldi M, Termine A, Ghigo E.** Changes in awakening cortisol response and midnight salivary cortisol are sensitive markers of strenuous training induced fatigue. *J Endocrinol Invest*, 2008; 31:16-24.
- Mohr M, Krstrup P, Bangsbo J.** Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. *J Sports Sci*. 2003; 21:519-528.
- Mohr M, Krstrup P, Nybo L, Nielsen J, Bangsbo J.** Muscle temperature and sprint performance during soccer matches-beneficial effect of re-warm-up at half-time. *Scand J Med Sci Sports*, 2004; 14:156-162.
- Mole P, Oscai L, Holloszy J.** Adaptation of muscle to exercise. Increase in levels of palmitoylCoA synthetase, carnitinepalmitoyltransferase, and palmitoylCoA dehydrogenase, and in the capacity to oxidize fatty acids. *J Clin Invest*, 1971; 50: 2323-2330,
- Moller N, Jorgensen J, Alberti K, Flyvbjerg J, Schmitz O.** Short-term effects of growth hormone on fuel oxidation and regional substrate metabolism in normal man. *J Clin Endocrinol Metab*, 1990; 70:1179-1186.
- Montoye H.** Bone mineral in senior tennis players. *Scand J Sports Sci*, 1980; 2:26-32.
- Monnier J, Benhaddad A, Micallef J, Mercier J, Brun J.** Relationships between blood viscosity and insulinlike growth factor I status in athletes. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2000; 22:277-286.

- Moreira A, Arsati F, Oliveira Y, da Silva DA, de Araújo V.** Salivary cortisol in top-level professional soccer players, 2009; 106:25-30.
- Mortatti A, Moreira A, Aoki M, Crewther B, Castagna C, Arruda A, Filho J.** Effect of competition on salivary cortisol, immunoglobulin A, and upper respiratory tract infections in elite young soccer players. *J Strength Cond Res*, 2012; 26:1396-1401.
- Mowszowicz I.** Le testicule endocrine. In : Mauvais-javis P, (eds) *Médecine de la reproduction Masculine*. Paris: Flammarion Sciences, 1984:85-111.
- Mujika I, Chatard J, Padilla S, Guezennec C, Geyssant A.** Hormonal responses to training and its tapering off in competitive swimmers: relationships with performance. *Eur J Appl Physiol*, 1996; 74:361-366.
- Mujika I, Santisteban J, Castagna C.** In-season effect of short-term sprint and power training programs on elite junior soccer players. *J Strength Cond Res*, 2009; 23:2581-2587.
- Muller E.** Neural control of somatotrophic function. *Physiol Rev*, 1987; 67:962-1053.
-

N.

- Näveri H.** Blood hormone and metabolite levels during graded ergometer exercise. *Scand J Clin Lab Invest*, 1985; 45:599-603.
- Nebigh A, Rebai H, Elloumi M, Bahlous A, Zouch M, Zaouali M, Alexander C, Sellami S, Tabka Z.** Bonemineral density of young boy soccer players at different pubertal stages: Relationships with hormonal concentration. *Joint Bone Spine*, 2009; 76: 63-69.
- Nemet D, Eliakim A.** Growth hormone-insulin-like growth factor-1 and inflammatory response to a single exercise bout in children and adolescents. *Med Sport Sci*, 2010; 55:141-155.
- Nemet D, Connolly P, Pontello-Pescatello A.** Negative energy balance plays a major role in the IGF-I response to exercise training. *J Appl Physiol*, 2004; 96:276-282.
- Nevill M, Holmyard D, Holl G, Allsop P, Van Oosterhout A, Burrin J, Nevill A.** Growth hormone responses to treadmill sprinting in sprint- and endurance-trained athletes. *Eur J Appl Physiol*, 1996; 72:460-467.
- Nguyen U, Mougin F, Simon-Rigaud M, Rouillon J, Marguet P, Regnard J.** Influence of exercise duration on insulin-like growth factor and its binding proteins in athletes. *Eur J Appl Physiol*, 1998; 78:533-537.

- Nicklas B, Ryan A, Treuth M, Harman S, Blackman M, Hurley B, Rogers M.** Testosterone, growthhormone and IGF-I responses to acute and chronic resistive exercise in men aged 55-70 years. *Int J Sports Med*, 1995; 16:445-450.
- Nicolau G, Haus E, Lakatua D, Bogdan C, Sackett-Lundeen L, Popescu M, Berg H, Petrescu E, Robu E.** Circadian and circannual variations of FSH, LH, testosterone, dehydroepiandrosterone-sulfate (DHEA-S) and 17-hydroxy progesterone (17 OH-PROG) in elderly men and women. *Rev Roum Med Endocrinol*, 1985; 23:223-246.
- Nikoladis P and Karidis N.** Physique and Body Composition in Soccer Players across Adolescence. *Asian Journal of Sports Medicine*, 2011; 2:75-82.
- Nikolaidis P.** Elevated body mass index and body fat percentage are associated with decreased physical fitness in soccer players aged 12-14 years. *Asian J Sports Med*, 2012; 3:168-174.
- Nindl B, Kraemer W, Marx J, Areciero P, Dohi K, Kellogg M, Loomis G.** Overnight responses of the circulating IGF-I system after acute, heavy-resistance exercise. *J Appl Physiol*, 2001; 90:1319-1326.
- Nindl B, Castellani J, Young A et al.** Differential responses of IGF-I molecular complexes to military operational field training. *J Appl Physiol*, 2003; 95:1083-1089.
- Nooitgedagt A, Koppeschaar H, De Vries W, Sidorowicz A, Klok L, Dieguez C, Mallo F.** Influence of endogenous cholinergic tone and growth hormone-releasing peptide-6 on exercise induced growth hormone release. *Clin Endocrinol (Oxf)*, 1997; 46:195-202.
-

O.

- O'Connor P, Corrigan D.** Influence of short-term cycling on salivary cortisol levels. *Med Sci sports Exerc*, 1987; 19:224-228.
- Obert P, Mandigout S, Vinet A, Courteix D.** Effect of aerobic training and detraining on left ventricular dimensions and diastolic function in prepubertal boys and girls. *International Journal. Sports Medicine*, 2001 ; 22:90-96.
- Obminski Z, Stupnicki R.** Comparison of the testosterone to cortisol ratio values obtained from hormonal assays in saliva and serum. *J Sports Med Phys Fitness*, 1997; 37:50-55.
- Ogushi T, Ohashi J, Nagahama H, Isokawa M, Suzuki, S.** Work intensity during soccer match-play: A case study. *J Sport Sci*, 1992; 10:168.

Ohashi J, Togari H, Isokawa M. Measuring movement speeds and distance covered during soccer match-play. In Reilly T, Lees A, Davids K and Murphy WJ (eds), Science and Football, London/New York, 1988; 51-59.

Orsetti A, Brun J, Bouix O, Monnier J, Fédou C. Hormones somatotrope, somatomédine C et protéines porteuses des somatomédines dans trois groupes de sportifs soumis à un entraînement intensif : marqueurs de l'intensité d'entraînement. In : XVI congrès national scientifique de la société française de médecine du sport Strasbourg, 20-22 juin 1996.

Owen A, Wong del P, Paul D, Dellal A. Effects of a periodized small-sided game training intervention on physical performance in elite professional soccer. J Strength Cond Res, 2012; 26:2748-2754.

P.

Passelergue P, Lac G. Cortisol, testosterone et rapport testosterone/Cortisol au cours salivaire au cours d'une compétition de lutte et lors de la récupération. Science & Sports, 1998; 13: 295-296.

Panfil R, Naglak Z, Bober T and Zaton E. Searching and developing talents in soccer: A year of experience. In Proceedings of the 2nd Annual Congress of the European College of Sport Science (edited by J. Bangsbo, B. Saltin, H. Bonde, Y. Hellsten, B. Ibsen, M. Kjaer and G. Sjøgaard), 1997; 649- 650.

Petraglia F, Barletta C, Facchinetti F, Spinazzola R, Monzani A, Scavo D, Genazzani AR. Response of circulating adrenocorticotropin, β -endorphin, β -lipotropin and cortisol to athletic competition. Acta Endocrinol, 1988; 118:332-336.

Petruzzello S, Tate A. Brain activation, affect, and aerobic exercise: an examination of both state-independent and state-dependent relationships. Psychophysiology, 1997; 34:527- 533.

Peyreigne C, Bouix D, Fédou C, Mercier J. Effect of hydration on exercise-induced growth hormone response. Eur J Endocrinol, 2001; 145:45-450.

Peyreigne C, Brun J, Monnier J, Abecassis M, Fédou C, Raynaud E, et al. Interactions entre la fonction somatotrope et l'activité musculaire. Sci Sports, 1997; 12:4-18.

Philippaerts R, Vaeyens R, Janssens M, et al. The relationship between peak height velocity and physical performance in youth soccer players. J Sport Sci, 2006; 24:221-230.

Poehlman E, Copeland K. Influence of physical activity on insulin-like growth factor-1 in healthy younger and older men. J Clin Endocrinol Metab, 1990; 71:1468-1473.

- Poehlman E, Rosen C, Copeland K.** Influence of endurance training on insulin-like growth factor-1 in older individuals. *Metab*, 1994; 43:1401-1405.
- Pontirolli A, Lanzi R, Monti L, Sandoli E, Pozza G.** Growth hormone (GH) autofeedback on GH response to GH-releasing hormone. Role of free fatty acids and somatostatin. *J Clin Endocrinol Metab*, 1991; 72:495-495.
- Port K.** Serum and Saliva Cortisol Responses and Blood Lactate Accumulation during Increment Exercise Testing. *Int J Sport Med*, 1991; 12:490-494.
- Prioux J, Ramonatxo M, Mercier J, Granier P, Mercier B, Prefaut C.** Changes in maximal exercise ventilation and breathing pattern in boys during growth: a mixed cross-sectional longitudinal study. *Acta Physiol Scand*, 1997; 161:447-458.
- Pritzlaff C, Wideman L, Weltman J, Abbott R, Gutgesell M, Hartman M, Veldhuis J, Weltman A.** Impact of acute exercise intensity on pulsatile growth hormone release in men. *J Appl Physiol*, 1999; 87:489-504.
- Pritzlaff C, Wideman L, Weltman J, Abbott R, Gutgesell M, Hartman M, Veldhuis J, Weltman A.** Gender governs the relationship between exercise intensity and growth hormone release in young adults. *J Appl Physiol*, 2002; 92:2053-2060.
- Pritzlaff C, Wideman L, Blumer J, Jensen M, Abbott R, Gaesser G, Veldhuis J, Weltman A.** Catecholamine release, growth hormone secretion, and energy expenditure during exercise vs. Recovery in men. *J Appl Physiol*, 2000; 89:937-946.
-

R.

- Raastad T, Glomsheller T, Bjørø T, Hallén J.** Recovery of skeletal muscle contractility and hormonal responses to strength exercise after two weeks of high-volume strength training. *Scand J Med Sci Sports*, 2003; 13:159-68.
- Raczynska B, Lukaszewska J, Wojcieszak I, Wierzynska-Starosta A.** Influence de l'effort physique sur la sécrétion du cortisol chez les sportifs de différentes disciplines. *Méd Sport*, 1980; 54:204-212.
- Rampinini E, Coutts A, Castagna C, Sassi R, Impellizzeri F.** Variation in top level soccer match performance. *Int J Sports Med*, 2007a; 28:1018-1024.
- Rampinini E, Impellizzeri F, Castagna C, Abt G, Chamari K, Sassi A, Marcora SM.** Factors influencing physiological responses to small-sided soccer games. *J Sports Sci*, 2007b; 25:659-666.

- Rampinini E, Impellizzeri F, Castagna C, Coutts AJ, Wisløff U.** Technical performance during soccer matches of the Italian serie A league: effect of fatigue and competitive level, *J Sci Med Sport*, 2009; 12:227-233.
- Reilly T.** Motion analysis and physiological demands. In Reilly T (eds), *Science and Football* Londo, 1996; 65-81.
- Reilly T.** Physiological aspects of soccer. *Biol. Sport*, 1994; 11:3-20.
- Reilly T.** Fundamental studies on soccer. *Sportwissenschaft und sportpraxis*(Hambourg), 1986; 114-121
- Reilly T, Bangsbo J, Franks A.** Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *J Sport Sci*, 2000; 18:669–683.
- Reilly T, Williams A, Nevill A, Franks A.** A multidisciplinary approach to talent identification in soccer. *Journal of Sports Sciences*, 2000; 18:695-702.
- Rhodes Hand Espersen T.** Work intensity during soccer training and match play. In Reilly T, Lees A, Davids K and Murphy WJ, *Science and football*, 1988; 68-75.
- Riad-Fahmy D, Read G, Walker R, Griffiths K.** Steroids in saliva for assessing endocrine function. *Endor Rev*, 1982; 3:367-395.
- Rienzi E, Drust B, Reilly T, Carter J, Martin A.** Investigation of anthropometric and work-rate profiles of elite South American international soccer players. *J Sports Med Phys. Fitness*, 2000; 40:162-169.
- Roelen C, Devries W, Koppeschaar H.** Plasma insulin-like growth factor-I and high affinity growyhhormaone-binding protein levels increase after 2 weeks of strenuous physical training. *Int J Sports Med*, 1997; 18:238-241.
- Roemmich J, Richmond R, Rogol A.** Consequences of sport training during puberty. *J Endocrinol Invest*, 2001; 24:708-715.
- Roemmich J, Sinning W.** Weight loss and wrestling training: effects on nutrition, growth, maturation, body composition, and strength. *J Appl Physiol*, 1997; 82:1751-1759.
- Rogol A, Weltman J, Evans W, Veldhuis J, Weltman A.** Long-term endurance training alters thehypothalamic-pituitary axes for gonadotropins and growth hormone. *Endocrinol Metab Clin North Am*, 1992; 21:817-832.
- Roelen C, de Vries W, Koppeschaar H, Vervoorn C, Thijssen J, Blankenstein M.** Plasma insulin-like growth factor-I and high affinity growth hormone-binding protein levels increase after two weeks of strenuous physical training. *Int J Sports Med*, 1997; 18:238-241.
- Rösch D, Hodgson R, Peterson L, Graf-Baumann T, Junge A, Chomiak J, and Dvorak, J.** Assessment and evaluation of football performance. *Am J Sports Med*, 2000; 28: 29–39.

Rosendal L, Lanberg H, Flyvbjerg A, Frystyk J, Orkov H, Kjaer M. Physical capacity influences the response of insulin-like growth factor binding proteins to training. *J Appl Physiol*, 2002; 93:1669-1675.

Rosenfeld RG. Circulating growth hormone binding proteins. *Horm Res*, 1994; 42:129-132.

Rosenfeld R, Pham H, Cohen P, Fielder P, Gargosky S, Muller H, Nonoshita L, Oh Y. Insulin-like growth factor binding proteins and their regulation. *Acta Paediatr*, 1994; 399:S154-S158.

Rutenfranz J, Andersen K, Seliger V, Klimmer F, Ilmarinen J, Ruppel M, Kylian H. Exercise ventilation during the growth spurt period: comparison between two European countries. *Eur J Pediatr*, 1981; 136:135-142.

S.

Salomon F, Cuneo R, Hesp R, Sonksen P. The effects of treatment with recombinant human growth hormone on body composition and metabolism in adults with growth hormone deficiency. *N Engl J Med*, 1989; 321:1797-1803.

Saltin B. Oxygen transport by the circulatory system during exercise in man. In Keul, J. (Ed), *Limiting factors of physical performance*. Stuttgart, 1973; 235-252.

Sannika E, Terbo P, Suominen J, Santti R. Testosterone concentrations in human seminal plasma and saliva and its correlation with non-protein-bound and total testosterone levels serum. *Int J Androl*, 1983; 6:319-330.

Scavo D, Barletta C, Vagiri D, Letizia C. Adrenocorticotrophic hormone, beta-endorphin, cortisol, growth hormone and prolactin circulating levels in nineteen athletes before and after half-marathon. *J Sport Med Phys Fitness*, 1991; 31:401-406.

Schmikli S, Vries W, Brink M, Backx F. Monitoring performance, pituitary-adrenal hormones and mood profiles: how to diagnose non-functional over-reaching in male elite junior soccer players. *Br J Sports Med*, 2012 Jan 23. [Epub ahead of print]

Scheett T, Nemet D, Stoppani J, Maresh C, Newcomb R, Cooper D. The effect of endurance-type exercise training on growth mediators and inflammatory cytokines in pre-pubertal and early pubertal males. *Pediatr Res*, 2002; 52:491-497.

Schwab R, Johnson G, Housh T, Kinder J, Weir J. Acute effects of different intensities of weight lifting on serum testosterone. *Med Sci Sports Exerc*, 1993; 25:1381-1385.

- Schwarz A, Brazel J, Hintz R, Mohan S, Cooper D.** Acute effect of brief low-and high-intensity exercise on circulating insulin-like growth factor (IGF) I, II and IGF-binding protein-3 and its proteolysis in young healthymen. *J Clin Endocrinol Metab*, 1996; 81:3487- 3492.
- Schwarz L, Kindermann W.** β -endorphin, adrenocorticotrophic hormone, cortisol and catecholamines during aerobic and anaerobic exercise. *Eur J Appl Physiol*, 1990; 61:165-171.
- Sedano S, Matheu A, Redondo J, Cuadrado G.** Effects of plyometric training on explosive strength, acceleration capacity and kicking speed in young elite soccer players. *J Sports Med Phys Fitness*, 2011; 51:50-58.
- Seidman D, Dolev E, Deuster P, Burstein R, Arnon R, Epstein Y.** Androgenic response to long-term physical training in males subjects. *Int J Sports Med*, 1990; 11:421-424.
- Seliger V.** Heart rate as an index of physical load in exercise. *Scripta medica*, medical faculty, Brno university, 1968; 41:231-240.
- Shimasaki S, Ling N.** Identification and molecular characterization of insulin-like growth factors binding proteins (IGFBP-1, -2, -3, -4, -5, -6). *Prog Growth Factor Res*, 1991; 3:243-266.
- Silverman H, Mazzeo R.** Hormonal response to maximal and submaximal exercise in trained and untrained men of various ages. *J Gerontol A Biol Sci*, 1996; 51:B30-B37.
- Sirek A, Sirek O.** The metabolic effects of plasma hormone surges. *Diab Nut Metab*, 1990; 3:157-169.
- Slattery K.** Practical Tests for Monitoring Fatigue and Recovery in Triathletes. School of Leisure, Sport and Tourism. Sydney, Australia: University of Technology, 2004.
- Smallwood S.** Thèse de doctorat en médecine. La leptine : le rôle physiologique dans la fonction somatotrope, transduction du signal et mécanismes d'internalisation, 2006.
- Smaros G.** Energy usage during football match. In: Vecchiet L, editor. Proceedings of the 1st International Congress on Sports Medicine Applied Football; 1979; Rome: D. Guanello, 1980, 801.
- Smith A, Clemmons D, Underwood L, Ben Ezra V, McMurray R.** The role of exercise on plasma somatomedin C/insulin-like growth factor 1 concentrations. *Metab*, 1995; 36:533-537.
- Smith R and Rutherford O.** Spine and total body bone mineral density and serum testosterone levels in male athletes. *Eur J Appl Physiol*, 1993; 67:330-334.
- Smodlaka V.** Cardiovascular aspects on soccer. *Physiol. Sport Med*, 1978; 18:9-16.
- Snegovskaya V, Viru A.** Elevation of cortisol and growth hormone levels in the course of further improvement of performance capacity in trained rowers. *Int Sports Med*, 1993a; 14:202-206.

- Snegovskaya V, Viru A.** Steroid and pituitary hormone responses to rowing exercises: relative significance of exercise intensity and duration and performance level. *Eur J Appl Physiol*, 1993b; 67:59-65.
- Souberbielle J.A** propos de l'exploration fonctionnelle de l'axe somatotrope. *Immuno-analyse & Biologie spécialisée*, 2003;18:28-34.
- Sørensen K, Aksglaede L, Munch-Andersen T, Aachmann-Andersen N, Leffers H, Helge J, Hilsted L, Juul A.** Impact of the growth hormone receptor exon 3 deletion gene polymorphism on glucose metabolism, lipids, and insulin-like growth factor-I levels during puberty. *J Clin Endocrinol Metab*, 2009; 94:2966-2969.
- Sporis G, Jukic I, Ostojic S, Milanovic D.** Fitness profiling in soccer: physical and physiologic characteristics of elite players. *J Strength Cond Res*, 2009; 23:1947-1953.
- Sporis G, Vucetić V, Jovanović M, Milanović Z, Rucević M, Vuleta D.** Are there any differences in power performance and morphological characteristics of Croatian adolescent soccer players according to the team position. *Coll Antropol*, 2011; 35:1089-1094.
- Spurrs R, Murphy A, Watsford M.** The effect of plyometric training on distance running performance. *European Journal of Applied Physiology*, 2003; 89:1-7.
- Staron R, Karapondo D, Kraemer W, Fry A, Gardon S, Falkel J, Hagerman F, Hikida R.** Skeletal muscle adaptation during early phase of heavy resistance training in men and women. *J Appl Physiol*, 1994; 76:1247-1255.
- Steinacker J, Lasker R, Hetzel W, Lormes W, Liu Y, Stauch M.** Metabolic and hormonal reaction during training in junior oarsmen. *Int J Sports Med*, 1993; 14:S24-S28.
- Steinacker J, Lormes W, Reissnecker S, Liu Y.** New aspects of the hormone and cytokine response to training. *Eur J Appl Physiol*, 2004; 91:382-391.
- Stewart C, Rotwein P.** Growth, differentiation and survival: multiple physiological functions for insulin-like growth factors. *Physiol Rev*, 1996; 76:1005-1026.
- Stokes K.** Growth hormone responses to sub-maximal sprint exercise. *Growth Horm IGF Res*, 2003; 13:225-238.
- Stokes K, Nevill M, Cherry P, Hall G, Lakomy H.** Effects of 6 weeks of sprint training on growth hormone responses to sprinting. *Eur J Appl Physiol*, 2004; 92:602-608.
- Stokes k, Nevill M, Hall G, Lakomy H.** Growth hormone responses to repeated maximal cycle ergometer exercise at different pedaling rates. *J Appl Physiol*, 2002; 92:602-608.
- Stølen T, Chamari K, Castagna C, Wisløff U.** Physiology of soccer: an update. *Sports Med*, 2005; 35:501-536.

Stupnicki R, Obmiski Z, Klusiewicz A, Viru A. Pre-exercise serum cortisol concentration and responses to laboratory exercise. *Eur J Appl Physiol*, 1995; 71:439-443.

Suikkari A, Sante T, Seppala M, Yki-Jarvinen H, Karonen SL, Koivisto VA. Prolonged exercise increases serum insulin-like growth factor-binding protein concentrations. *J Clin Endocrinol Metab*, 1989; 68:141-144.

Sutton J, Lazarus L. Growth hormone in exercise: comparison of physiological and pharmacological stimuli. *J Appl Physiol*, 1976; 41:523-527.

Sutton J, Colman M, Casey J, Lazarus L. Androgen responses during physical exercise. *Br Med J*, 1973; 1:520-522.

T.

Tabata I, Atomi Y, Miyashita M. Effect of physical training on responses of serum adrenocorticotrophic hormone during prolonged exhausting exercise. *Eur J Appl Physiol*, 1990; 61:188-192.

Taffe D, Jin L, Vu T, Hoffman A, Marcus R. Lack of effect of recombinant human growth hormone on muscle morphology and insulin-like growth factor expression in resistance trained elderly men. *J Clin Endocrinol Metab*, 1996; 81:421-425.

Tanner J. Growth endocrinology of the adolescence. In: Gardner L, editor. *Endocrine Genetic Diseases of childhood and Adolescence*. Philadelphia: WB Saunders p.1975; 14 - 64.

Tanskanen M, Kyröläinen H, Uusitalo A, Huovinen J, Nissilä J, Kinnunen H, Atalay M, Häkkinen K. Serum sex hormone-binding globulin and cortisol concentrations are associated with overreaching during strenuous military training. *J Strength Cond Res*, 2011; 25:787-97.

Taskin H. Evaluating sprinting ability, density of acceleration, and speed dribbling ability of professional soccer players with respect to their positions. *J Strength Cond Res*, 2008; 22:1481-1486.

Theintz G, Howald H, Weiss U, Sizonenko P. Evidence for a reduction of growth potential in adolescent female gymnasts. *J Pediatr*, 1993; 122:306-313.

Thissen J, Ketelslegers J, Underwood L. Nutritional regulation of the insulin-like growth factors. *Endocr Rev*, 1994; 15:80-101.

Thompson D, Weltman J, Rogol A, Metzger D, Veldhuis J, Weltman A. Cholinergic and opiodinvolvement in release of growth hormone during exercise and recovery. *J Appl Physiol*, 1993; 75:870-878.

Thomas V, Reilly T. Fitness assessment of English league soccer players through the competitive season. *Br. J. Sport Med*, 1979; 13:217-222.

Thorpe R, Sunderland C . Muscle damage, endocrine, and immune marker response to a soccer match. *J Strength Cond Res*, 2012; 26:2783-2790.

Thuma J, Gilders R, Verdum M, Loucks A. Circadian rhythm of cortisol confounds cortisol responses to exercise implications for future research. *J Appl Physiol*, 1995; 78:1657-1664.

Todorov T. Tennis de haut niveau, modifications osseuses et articulaires du membre supérieur actif du joueur (High-level tennis practice and changes in the bones and joints of the player's dominant upper limb). *Annales de l'ENSEPS*, 1975; 8:21-25.

Tsolakis C, Xekouki P, Kaloupsis S, Karas D, Messinis D, Vagenas G, Dessypris A. The influence of exercise on growth hormone and testosterone in prepubertal and early-pubertal boys. *Hormones (Athens)*, 2003; 2:103-112.

U.

Urhausen A, Gabriel H, Kindermann W. Blood hormones as markers of training stress and overtraining. *Sports Med*, 1995; 20:251-276.

Urhausen A, Gabriel H, Kindermann W. Impaired pituitary hormonal response to exhaustive exercise in overtrained endurance athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 1998; 30:407-414.

Urhausen A, Kindermann W. Behaviour of testosterone, sex hormone binding globulin (SHBG), and cortisol before and after a triathlon competition. *Int J Sports Med* 1987a; 8:305-308.

Urhausen A, Kindermann W. Diagnosis of overtraining: what tools do we have? *Sports Med*, 2002; 32:95-102.

Urhausen A, Kullner T, Kindermann W. A 7-week follow-up study of behavior of testosterone and cortisol during competition period in rowers. *Eur J Appl Physiol*, 1987b; 56:528-533.

V.

Vaeyens R, Malina R, Janssens M, Van Renterghem B et al. A multidisciplinary selection model for youth soccer: the Ghent Youth Soccer Project. *Br J Sports Med*, 2006; 40:928–934.

Vanderberg G, Veldhuis J, Frolich M, Roelfsema F. An amplitude-specific divergence in the pulsatile mode of growth hormone (GH) secretion underlines the gender difference in mean GH concentration secretions in men and premenopausal women. *J Clin Endocrinol Metab*, 1996; 81:2460-2467.

Van Gool D, Van Gerven D, Boutmans J. The physiological load imposed on soccer players during match play. In Reilly T, Lees A, Davids K and Murphy WJ (eds). *Science and football* (London/New York), 1988, 51-59.

Vanhelder W, Casey K, Goode R, Radmoski W. Growth hormone regulation in two type aerobic exercise of equal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol*, 1986; 55:236-239.

Vanhelder W, Radomski M, Goode R, Casey K. Hormonal and metabolic response to three types of exercise of equal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol*, 1985; 54:337-342.

Vänttinen, T, Blomqvist, M, Nyman, K, and Häkkinen, K. Changes in body composition, hormonal status, and physical fitness in 11, 13, and 15 year old Finnish regional youth soccer players during a two-year follow-up. *J Strength Cond Res*, 2011; 25:3342-3351.

Vasankari T, Kujala U, Taimela S, Torma A, Irjala K, Huhtaniemi I. Effects of long acting somatostatin analogue on pituitary, adrenal, and testicular function during rest and acute exercise: unexpected stimulation of testosterone secretion. *J Clin Endocrinol Metab*, 1995; 80:3298-3303.

Vasankari T, Kujala U, Heinonen O, Huhtaniemi I. Effects of endurance training on hormonal response to prolonged physical exercise in males. *Acta Endocrinologica*, 1993; 129: 109-113.

Veldhuis J, Liem A, South S, Weltman A, Weltman J, Clemmons D, Abbott R, Mulligan T, Johnson M, Pincus S, Straume M, Iranmanesh A. Differential impact of age, sex steroid hormones, and obesity on basal vs. pulsatile growth hormone secretion in men assessed in an ultrasensitive chemiluminescence assay. *J Clin Endocrinol Metab*, 1995; 80:3209-3222.

Verheijen R. La condition physique du footballeur. Pays-Bas : éditions Eisma bv, 1998.

Vervoorn C, Quist A, Vermulst L, Erich W, DeVries W, Thijssen J. The behaviour of the plasma free testosterone/Cortisol ratio during a season of elite rowing training. *Int J Sports Med*, 1991; 12:275-263.

Vicente-Rodriguez G, Jimenez-Ramirez J, Ara I, Serrano-Sanchez J, Dorado C, Calbet J. Enhanced bone mass and physical fitness in prepubescent footballers. *Bone*, 2003; 33:853-859.

Vinning R, McGinley R, Maksvytis J, Ho K. Salivary cortisol: a better measure of adrenal cortical function than serum cortisol. *Ann Clin Biochem*, 1983; 20:329-335.

Viru A. Plasma hormones and physical exercise. Review. *Int J Sports Med*, 1992; 13:201-209.

W.

Wahl P, Zinner C, Achtzehn S, Bloch W, Mester J. Effect of high- and low-intensity exercise and metabolic acidosis on levels of GH, IGF-I, IGFBP-3 and cortisol. *Growth Horm IGF Res*, 2010; 20:380-385.

Weltman A, Pritzlaff C, Wideman L, Weltman J, Blumer J, Abbott R, Hartman M, Veldhuis J. Exercise-dependent growth hormone release is linked to markers of heightened central adrenergic outflow. *J Appl Physiol*, 2000; 89:629-635.

Weltman A, Weltman J, Schurrer, Evans W, Veldhuis J, Rogol A. Endurance training amplifies the pulsatile release of growth hormone: effects of training intensity. *J Appl Physiol*, 1992; 72:2188-2196.

Weltman A, Weltman J, Womack C, Davis S, Blumer J, Gaesser G, Hartman. Exercise training decreases the growth hormone (GH) response to acute constant load exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 1997; 29:669-676.

Wheldon A, Savine R, Sonksen P, Holt R. Exercising in the cold inhibits growth hormone secretion by reducing the rise in core body temperature. *Growth Horm IGF Res*, 2006; 16:125-131.

Whitehead N. Conditioning for sport. Wakefield: EP Publishing, 1975.

Wideman A, Weltman J, Shah N, Story S, Veldhuis J, Weltman A. Effects of gender on exercise-induced growth hormone (GH) release. *J Appl Physiol*, 1999; 87:1154-1162.

Williams A and Reilly T. Talent identification and development in soccer. *J Sports Sci*, 2000; 18:669-683.

Williams C, Armstrong N, Powell J. Aerobic responses of prepubertal boys to two modes of training. *British Journal of Sports Medicine*, 2000; 34:168-173.

Wilson D, Horowitz J. Exercise-induced changes in growth hormone and somatomedin-C. *Am J Med Sci*, 1987; 23:216-217.

Wisløff U, Castagna C, Helgerud J, Jones R, Hoff J. Strong correlation of maximal squat strength with sprint performance and vertical jump height in elite soccer players. *Br J Sports Med*, 2004; 38:285-288.

Wisløff U, Helgerud J, Hoff J. Strength and endurance of elite soccer players. *Med Sci Sports Exerc*, 1998; 30:462-467.

Withers RT, Maricic Z, Wasilewski S, Kelly L. Match analyses of Australian professional soccer players. *J Hum Mov Stud*, 1982; 8:159-176.

Wong del P, Wong SH. Physiological profile of Asian elite youth soccer players. *J Strength Cond Res*, 2009; 23:1383-1390.

Wong PW, Chamari K, Dellal A, Wisløff, U. Relationship between anthropometric and physiological characteristics in youth soccer players. *J Strength Cond Res*, 2009; 23:1204-1210.

Wong PL, Chamari K, Wisløff U. Effects of 12-week on-field combined strength and power training on physical performance among U-14 young soccer players. *J Strength Cond Res*, 2010; 24:644-652.

Y.

Yeh J, Aloia J, Chen M, Ling N, Koo H, Millard W. Effect of growth hormone administration and treadmill exercise on serum and skeletal IGF-I in rats. *Am J Endocrinol Metab*, 1994; 266:E129-E135.

Z.

Zaccaria M, Varnie M, Pizza P, Novetta D, Ermolao A. Blunted growth hormone response to maximal exercise in middle-aged versus subjects and no effect of endurance training. *J Clin Endocrinol Metab*, 1999; 84:2303-2307.

Zanconato S, Moromisato D, Moromisato M, Woods J, Braesel J, Leroith D, Roberts C, Cooper D. Effect of training and growth hormone suppression on insulin like growth factor 1 Mrna IN young rats. *J Appl Physiol*, 1994; 76:2204-2209.

Annexes

ARTICLE 1

Physical and anthropometric profile according playing position in Tunisian soccer players: A longitudinal study

Emmeran Le Moal,¹Mohamed Ali Hammami¹, Nebigh A¹,Omar Ben Ounis,^{*} ; Abderraouf Ben Abderrahman^{2,3}, Hassane Zouhal¹.

1- Laboratoire Mouvement Sport Santé (M2S). UFR APS, Université Rennes 2, Campus la Harpe. 35044 Rennes, Cedex France.

2- Laboratoire des adaptations Cardio-circulatoires, Respiratoires, Métaboliques et Hormonales à l'Exercice Musculaire 99/UR/0867, Faculté de Médecine Ibn El Jazzar, 4002 Sousse, Tunisia.

3- Institut supérieur du sport et de l'éducation physique, Ksar-Saïd, Université de Mannouba, Tunisie.

Running Head:Profile of Young Tunisian Footballer.

Corresponding author:

Ben Ounis Omar (PhD)

Address: Laboratoire de Physiologie, Faculté de Médecine Ibn El Jazzar, avenue Mohamed Karoui 4002, Sousse, Tunisie.

Tel: 00 216. 20. 703. 111 / **Fax :** 00 216. 73. 224. 899; **E-mail:** omar_oda@yahoo.fr

E-Mail:omar_oda@yahoo.fr

Abstract

Purpose: We undertook to observe the evolution of anthropometric and physical fitness parameters of elite young Tunisian soccer players and to determine a reference profile according to their playing positions.

Methods: Forty one subjects (15.3 ± 0.2 years, 69.44 ± 6.39 kg, 176.88 ± 4.78 cm) resident in a Tunisian federal youth academy of soccer have participated to this study and had been divided in 5 groups related to their playing positions: goalkeepers (GB, n=7), full-backs (FB, n=10), central defenders (DEF, n=6), midfielders (MF, n=9) and forwards (FW, n=8). Different anthropometrics measurements, fitness tests to evaluate aerobic performance and anaerobic performance were realized at the beginning (T1) and at the end of the season (T2).

Results: Results show a significant increase of height (176.9 ± 4.8 to 179.9 ± 4.3 cm) ($p < 0.01$), the maintenance of body mass (69.4 ± 6.4 to 69.1 ± 5.9 kg) and a reduction of fat body mass (12.3 ± 3.2 to $12.2 \pm 2.3\%$; $p < 0.05$). Moreover, the aerobic performance assessed by Yo-Yo Tests and anaerobic performance assessed by short sprint on 10 and 30m and 5JT (11.09 ± 1.22 to 12.24 ± 0.67) increased significantly ($p < 0.05$).

Keywords: Anthropometry; Performance; Elite soccer; Young; Training.

INTRODUCTION

Soccer is a multifactorial team sports, it depends of technical, tactical, psychological and physical parameters [1]. This activity requires well developed physical fitness to be successfully played [2, 3]. Optimize the physical potential of young soccer players is one of the main objectives of youth soccer academies. Indeed, elite soccer player must be prepared to perform and sustain high loads of training observed at elite level. The observation and the characterization of some anthropometric and physical fitness parameters of elite youth soccer players allow distinguishing elite to non elite based on anthropometrics and physical fitness parameters as the height, weight, body fat or maximum oxygen consumption ($\dot{V}O_2$ max), sprint performance and height jump [4, 5, 6]. It also allows determining, at least, a reference profile according to the playing position [4, 7] or to age category [8, 7].

Previous studies showed that profile was different according to playing positions in elite adults [1, 6, 9], indicating that the goalkeepers are taller and heavier than outfield players. Hencken et al., [10] added that midfielders are the smallest and lightest outfield players whereas defenders are tallest and heaviest outfield players. Furthermore, there are also physiological differences between playing positions in terms of $\dot{V}O_2$ max where fullbacks and midfielders have the highest values [1, 9].

These marked differences in terms of anthropometry as well as in physiological and physical performance may potentially result of a functional specialization of players related to playing positions during their training program in youth academies.

In young soccer players, several studies reported some information about a reference profile in elite young soccer players [8, 11, 6] but failed to set an accurate profile of elite young soccer players according to their playing positions based on anthropometrics parameters and physical capacities. Indeed, Reilly et al., [6] have reported that there are some positional differences in anthropometry but no one in physical fitness and $\dot{V}O_2$ max in the U-16 selection of England [6]. Recently, Wong et al. [7] have shown anthropometric differences between playing positions but no differences in term of physiological characteristics in U-14 male Chinese soccer players. These results were probably due to their soccer training experience which was very low (<5 years), the number of training sessions (twice a week + one match) and the duration of training and match-play. To the view of such parameters, it seems that there are differences between elite youth soccer players from China and from Europe characterized by higher training loads (5 to 7 sessions per week + 1 match play), a higher training experience due to an earlier process of selection.

In Europe, the process of development of elite young soccer players is characterized by high training loads due to a high volume of training, which can modify the player's profile according to playing position.

To our knowledge, there is no long-term study which has investigated the effect of soccer training process in Africa. This study is the first to realize a longitudinal monitoring of young elite North African soccer players and hence provide information concerning responses to elite soccer training and player's profile according to playing position.

Consequently, the aim of this study was to examine the evolution of some anthropometric and physical fitness parameters in Tunisian youth elite soccer players

during one season in a federal youth academy, and to analyze whether there are differences between young soccer players according to their playing positions. We hypothesized that there are differences in terms of anthropometric and physical fitness parameters in elite young soccer players according to playing position.

METHODS AND SUBJECTS

Participants

Forty-one, U-16 soccer players (15.3 ± 0.2 years) participated to this study and all of them are residents in the federal youth academy of Tunisia. They practiced soccer from 6 to 7 times per week with one match-play in the week-end. Most of them were members of the national selection of Tunisia and they had for objective to prepare the preliminaries of the U-17 Championship of African Nations. There were classified in 5 groups according to their playing positions: goalkeepers (GB, n=7), central defenders (DEF, n=10), full-backs (FB, n=6), midfielders (MF, n=9) and forwards (FW, n=8).

Protocol

All the subjects performed two times (T1-T2) in the season the followed sessions of tests: in T1, three weeks after the beginning of the preparation period, in order to avoid effect of detraining induced by the end of the season and in T2 corresponding to the end of the competitive period. Rate of progression expresses the evolution of the variables from the start to the end of the study. All players and their parents or guardians were fully informed and they signed a consent form.

Anthropometric Measurements

Each player was weighted and his stature was determined at T1 and T2. For determined their body fat, skinfold measurements were taken in four sites: bicipital, tricipital, suprailiacal and subscapular using a Harpenden skinfold caliper (British Indicators Ltd., Luton, UK). Fat body mass was calculated according to the equations previously described by Durnin and Womersley [12]

Physical fitness characteristics

The measurements were realized on 2 days. On the first testing day, after a standardized warm-up of 15 minutes, consisting of low-intensity running, followed by a series of exercises (high knee lift, butt kicks, straight line skipping) and then short accelerations, subjects have performed twice several tests. All the players performed a 5JT consisting of five successive maximal long jumps which aim to assess the lower limb's power as described by Chamari et al., [13].

Ten minutes later, the subjects performed a 30m sprint with 10m lap time measured by an infrared photoelectronic cell (Speedtrap II Wireless Timing System; Brower Timing Systems, Draper, UT). On the second testing day, the subjects performed after a standardized warm-up a Yo-Yo Test: The version of Yo-Yo Intermittent Endurance Tests Level 1 (*YYIER*) consists to perform a series of 20m shuttle runs at a pace set by an audio metronome with a standard rest interval between shuttles (5 s shuttles of 2.5 m by walking-active recovery) whereas the version of Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 1 (*YYIRT*) consists also to perform a series of 20m shuttle runs at a pace set by an audio metronome with a standard rest interval between shuttles (10 s shuttles of 5 m by walking-active recovery). The speed for shuttles was progressively increased, and the

test was terminated when the player was unable to maintain the required speed. The distance covered in the shuttles was recorded for analysis but the distance covered during the rest interval was excluded [13, 15].

Training

The weekly training is composed by 6 or 7 sessions of varied works. The two days following the match (D+1 to D+2), the emphasis is on recovery process based on low intensity runs associated with stretching. After this period of low intensity training, contents of physical training on D+3 and D+4 are focused on aerobic development based on high-intensity interval training, small side games, or repeated sprints and on strength development with loads in gym. Before match play (D-2 to D-1) the solicitations are short with special emphasis to coordination and short velocity solicitations.

Statistical Analyses

The data are reported as mean \pm SD. The normality distribution of the data was checked with the Kolmogorov-Smirnov test. To compare the effects of training and those of playing positions, a two-way ANOVA with repeated measures was used. Post hoc analyses were carried out using the Student-Newman-Keuls test. An alpha of $p \leq 0.05$ was used for statistical significance. The effect sizes (d) for these differences were also determined as described by Cohen [16]. Effect size values of 0.2, 0.5 and above 0.8 were considered to represent a small, moderate and large difference, respectively. According to Bland and Altman [17], intra-class correlations (ICCs) were also calculated. Those analyses were realized by Sigma Stat 3.10 software (SPSS, Chicago, IL, USA).

RESULTS

Anthropometric and physical fitness parameters

Anthropometric parameters are presented in Table 1. The height increases significantly from ($p<0.01$). The body mass did not change significantly between T1 and T2. Also, the % of fat mass did not change significantly throughout the season. All the physical fitness parameters are presented in Table 2.

The 5JT performance increased significantly from the start of the season (T1) to the end (T2) ($p<0.01$). Similarly, sprint performances on 10 and 30m were significantly better at T2 than at T1 ($p<0.001$). Additionally, performances of the Yo-Yo tests increased significantly ($p<0.001$) during the season.

Playing positions

Results concerning anthropometric parameters according to playing position are presented in Table 3. In T1 and T2, GK were significantly taller and heavier than all the outfield players ($p<0.05$). There are no significant differences among outfield players concerning height and body weight. Similarly, in T2, GK were significantly taller than outfield players. Concerning the % of fat, there were no significant differences between all the players,

Results concerning physical fitness parameters are presented in Table 4. The performance on 5JT did not reveal significant differences according to playing position among subjects whatever in T1 or in T2. Similarly, we observed no differences in term of sprint performances in 10 and 30m. Concerning performances on Yo-Yo Tests, we found no positional differences in T1 whereas in T2, outfield players were significantly better than goalkeepers ($p<0.01$).

DISCUSSION

The purpose of the present study was to examine the evolution of anthropometric and physical fitness parameters in Tunisian elite young soccer players and to analyze differences according to their playing position. This study showed that anthropometric parameters and fitness performance measured increased significantly throughout the season suggesting that one season of elite training may induce significant anthropometric development and an increase of physical fitness parameters.

Moreover, this study also showed that it was difficult to provide an accurate reference profile according to the playing position in this population of U-15 elite Tunisian soccer players.

Concerning anthropometric data, our subjects were taller than those reported in the literature [4, 8, 18, 19]. Indeed, U-16 French and Portuguese elite soccer players were 173.5 ± 8 cm and 174 ± 4 cm, respectively [8, 11]. The increase of the height could be explained by the biological development of this group. Indeed, these young soccer players were U-15 the year of the experiment. However, Philippaerts et al. [18] have indicated that the peak height velocity was situated close to fourteen years. Subjects were also heavier than those reported in the literature [4, 8, 18, 19]. Our data concerning the percentage of fat mass were closed to those reported in the literature [20, 4] but slightly superior.

As shown in previous studies in young soccer players, [4, 7] GK are significantly taller, heavier and present a higher percentage of fat mass than outfield players in which there are no differences in terms of height and weight measured. However, FW presented similar percentage of fat mass than the others outfield players. On the contrary, Gil et

al., [4] have reported that the FW have the highest muscular mass. Several studies realized in adult elite soccer players are in accordance with these current findings [1, 10, 9].

Those differences of anthropometric characteristics could be explained by genetic, social, nutritional and cultural considerations which can illustrate the differences between European and North African's somatotype of soccer players [21]. It can be explained also by a more advanced maturity process. Detection and selection process used could also explain these differences. It is possible that coaches and staff have chosen players based on anthropometrics characteristics in order to impose a high physical impact to the opponent, and hence, to use a strategy based on athletic aspects of the game to be successful. Concerning physical fitness parameters, sprint performances increased significantly throughout the season. Indeed, the 5JT performance increased significantly. This test was significantly correlated to the vertical high jump and explosiveness variables measured during isokinetic testing, and valid to assess training adaptations [13]. In the light of this result, we can confirm that this increase is meaningful [22] with more than 10.3% of gain. In soccer, few studies have used this test, explaining the lack of values of references for this age category.

Chamari et al., [13] measured in U-23 Tunisian National Olympic team a performance in 5JT around $12.99 \pm 0.53\text{m}$ whereas our elite players jump around $12.24 \pm 0.67\text{m}$. This proximity between these two results suggests the good development of muscular power and the effectiveness of training program in our elite young soccer players. No differences of playing positions were observed between each group in 5JT. Performance on 10 and 30m sprint increased significantly (3.7 and 2.5%, respectively) over this

season. Stølen et al., [3] reported that 96% of sprint realized during a match are lower than 30m.

However, few studies on young soccer players used the 30m sprint preferring the 40m [23, 8]. Our values were close to those reported in the literature [24]. Chamari et al., [20] reported in juniors' Tunisian and Senegalese players' slightly better performance (4.38 ± 0.18 s) than our subjects. The training focalized on velocity and coordination appears to be effective to develop the ability to sprint on short distance and related to analyze the activity of elite soccer players [3]. Surprisingly, we observed no positional differences on anaerobic profile. Moreover, goalkeeper's performances were similar to those of outfield players. Di Salvo et al., [24] have showed that the activity profile of elite goalkeepers were decisive during the match, especially the sprints ranged from 0 to 5 m, this observation could explain, at least in part, our findings. It also means that outfields players do not differ in their sprint characteristics whereas the activity on the pitch is not the same whatever in young [25] or in adults [26]. It seems that sprint training can be more individualized in respect to the playing position as well as physical and technical activity [27]. Wong et al., [7] have reported that DEF were the faster in 30 m U-14 Chinese.

In this study, MF reached the best performance (4.35 ± 0.3 s) on 30m sprint whereas the DEF have presented the lowest performance (4.41 ± 0.2 s). This latter were in opposite to the results reported by Gil et al., [4] who observed the best values in agility, velocity and power in forwards. Based on these results, probably the tactic used by these different teams is not the same, particularly for the forwards who seem to be heavier rather than faster. Tactic used by coach and staff surely influence the choice of anthropometric and physical profile to occupy this strategic position [28, 29, 26].

The specific soccer endurance assessed by the YYIER increased significantly during this year of training. If initial values were inferior to those of Wong et al., [7] observed in U-14 Chinese elite soccer players ($1933 \pm 787.5\text{m}$), in contrast the final values of our players were largely superior (28.8%). Moreover, values of the YYIRT increased also significantly. These increases could be mainly explained by the lower physical potential of the players at the beginning of the season. In fact, the tests were set just after their integration into the structure and just after a holiday break in training which was accompanied by a diminution of volume and intensity of training and also a lack of nutritional monitoring. These data highlight the deleterious effects of summer break on physical fitness. Furthermore, this gain could also be explained, by the process of biological development involving the maturity of central and peripheral functions as cardio-respiratory, muscular, hormonal and enzymatic [30] and/or by the training realized in this academy. As training in youth academy is known to be important to prepare players to a high level of competition [31], we can suppose that the training plan was effective and prepare them to elite soccer.

However, in absence of a control group these results could be affected by the maturity process. There were also some positional differences in physical performances as reported by Bangsbo et al., [14]. If there were no differences in T1 between our groups, the YYIER or YYIRT performances in T2 of outfield players were significantly higher. Time spent on the field whatever in training sessions or in official game may have induced specific adaptations allowing them to be more able to repeat high intensity exercise.

In accordance with Gil et al., [4] we observed also that FW have the best endurance capacity judged by the performance in YYIER or YYIRT despite of their percentage of

fat mass. Nevertheless, these results were at the opposite of those found by Wong et al., [7] who have reported greater values for MF than FW. These results were also in contradiction with the scientific literature according to the elite adult soccer players [32] where MF have the best endurance capacity or performed the greatest total distance and total distance in high-intensity covered in match play [13]. These differences could be explained by the training program proposed this year and/or the relative inexperience of training and match of our young players compared to elite adult soccer players.

In conclusion, our result showed a significant increase of anthropometric characteristics and physical fitness throughout one season of training in elite young soccer players but was unable to distinguish them according to their playing positions. Nonetheless, to the view of the pattern of activity of soccer elite players in game, differences in function are highlighted and could explain physical and physiological differences. Individualized training according to the individual ability and playing position could improve the match-play performance and allow determining an accurate reference profile according to the playing position. However, further studies are needed to understand the differentiation process according to the playing position.

REFERECES

- 1) Bangsbo, J. The physiology of soccer--with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1994, 619, 1–155.
- 2) Castagna, C., Manzi, V., Impellizzeri, F., Weston, M., Barbero Alvarez, JC. Relationship between endurance field tests and match performance in young soccer players, *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2010, 12, 3227–3233.

- 3) Stølen, T., Chamari, K., Castagna, C., Wisløff, U. Physiology of soccer: an update. *Sports Medicine*, 2005, 6, 501–536.
- 4) Gil, S., Ruiz, F., Irazusta, A., Gil, J., Irazusta, J. Physiological and anthropometric characteristics of young soccer players according to their playing position: Relevance for the selection process. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2007, 2, 438–445.
- 5) Jankovic, S., Heimer, N., Matkovic, BR. Physiological profile of prospective soccer players. In: Reilly, T., Clarys, J., Stibbe, A., editors. *Science and football II*. London: E & FN Spon, 1993, 295–297.
- 6) Reilly, T., Bangsbo, J., Franks, A. 2000 Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *Journal of Sports Sciences*, 2000, 9, 669–83.
- 7) Wong, PW., Chamari, K., Dellal, A., Wisløff, U. Relationship between anthropometric and physiological characteristics in youth soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2009, 4, 1204–1210.
- 8) Le Gall, F., Carling, C., Williams, M., Reilly, T. Anthropometric and fitness characteristics of international, professional and amateur male graduate soccer players from an elite youth academy. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2008, 1, 90–95.
- 9) Sporis, G., Jukic, I., Ostojic, S., Milanovic, D. Fitness profiling in soccer: Physical and physiological characteristics of elite players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2009, 7, 1947–1953.
- 10) Hencken, C., White, C. Anthropometric assessment of Premiership soccer players in relation to playing position. *European Journal of Sport Sciences*, 2006, 4, 205–211.

- 11) Malina, RM., Peña Reyes, ME., Eisenmann, JC., Horta, L., Rodrigues, J., Miller, R.
Height, mass and skeletal maturity of elite Portuguese soccer players aged 11-16 years. *Journal of Sports Sciences*, 2000, 9, 685–93.
- 12) Durnin, JVGR., Wormersley, J. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *British Journal of Nutrition*, 1974, 1, 77–97.
- 13) Chamari, K., Chaouachi, A., Hambli, M., Kaouech, F., Wisløff, U., Castagna, C.
The five-jump test for distance as a field test to assess lower limb explosive power in soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2008, 3, 944–950.
- 14) Bangsbo, J., Iaia, FM., Krstrup, P. The Yo-Yo Intermittent recovery test: A useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. *Sports Medicine*, 2008, 1, 37–51.
- 15) Krstrup, P., Mohr, M., Amstrup, T., Rysgaard, T., Johansen, J., Steensberg, A., Pedersen, PK., Bangsbo, J. The yo-yo intermittent recovery test: physiological response, reliability, and validity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2003, 4, 697–705.
- 16) Cohen, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd edn.). Hillsdale, NJ:Lawrence Erlbaum, 1988.
- 17) Bland, JM., Altman, DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurements. *The Lancet*, 1986, 1, 307–310.
- 18) Philippaerts, RM., Vaeyens, R., Janssens, M., Van Renterghem, B., Matthys, D., Craen, R., Bourgois, J., Vrijens, J., Beunen, G., Malina, RM. The relationship between peak height velocity and physical performance in youth soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 2006, 3, 221–230.

- 19) Vaeyens, R., Malina, RM., Janssens, M., Van Renterghem, B., Bourgois, J., Vrijens, J., Philippaerts, RM. A multidisciplinary selection model for youth soccer: the Ghent Youth Soccer Project. *British Journal of Sports Medicine*, 2006, 11, 928–934.
- 20) Chamari, K., Hachana, Y., Ahmed, YB., Galy, O., Sghaïer, F., Chatard, JC., Hue, O., Wisløff, U. Field and laboratory testing in young elite soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 2004, 2, 191–196.
- 21) Chaouachi, M., Chaouachi, A., Chamari, K., Feki, Y., Amri, M., Trudeau, F. Effects of dominants somatotype on aerobic capacity trainability. *British Journal of Sports Medicine*, 2005, 12, 954–959.
- 22) Hopkins, WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, 2000, 1, 1–15.
- 23) Helgerud, J., Engen, LC., Wisloff, U., Höff, J. Aerobic endurance training improves soccer performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2001, 11, 1925–1931.
- 24) Di Salvo, V., Benito, PJ., Calderón, FJ., Di Salvo, M., Pigozzi, F. Activity profile of elite goalkeepers during football match-play. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 2008, 4, 443–446.
- 25) Buchheit, M., Mendez-Villanueva, A., Simpson, BM., Bourdon, PC. Match running performance and fitness in youth soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 2010, 11, 818–825.
- 26) Di Salvo, V., Baron, R., Tschan, H., Calderon Montero, FJ., Bachl, N., Pigozzi, F. Performance characteristics according to playing position in elite soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 2007, 3, 222–227.

- 27) Dellal, A., Wong, DP., Moalla, W., Chamari, K. Physical and technical activity to soccer players in French first league- with special reference to their playing position. *International Journal of Sports Medicine*, 2010, 2, 278–290.
- 28) Bradley, P., Carling, C., Arder, D., Roberts, J., Dodds, A., Di Mascio, M., Paul, D., Gomez-Diaz, A., Peart, D., Krustup, P. The effect of playing formation on high intensity running and technical profiles in English FA Premier League soccer matches. *Journal of Sports Sciences*, 2011, 8, 821–830.
- 29) Di Salvo, V., Pigozzi, F. Physical training of football soccer players based on their positional rules in the team. Effects of performance-related factors. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 1998, 4, 294–297.
- 30) Holloszy, JO., Coyle, EF. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *Journal of Applied Physiology*, 1984, 4, 831–838.
- 31) Williams, AM., Reilly, T. Talent identification and development in soccer. *Journal of Sports Sciences*, 2000, 9, 669–683.
- 32) Wisløff, U., Helgerud, J., Höff, J. Strength and endurance of elite soccer players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1998, 3, 462–467.

Table 1. Evolution of the anthropometric characteristics of the youth soccer players during one season. (mean \pm SD)

	T1	T2	Cohen's d	95%ICC
Height (cm)	176.9 (4.8)	179.9 (4.3)**	0.33	0.7/5.7
Weight (kg)	69.4 (6.4)	69.1 (5.9)	0.02	-6.6/6.0
% Fat mass	12.3 (3.2)	12.2 (2.3)	0.01	-4.48/4.28

Significant differences: *: $p < 0.05$; **: $p < 0.001$

Table 2. Evolution of physical fitness characteristics of youth soccer players during one season. (mean \pm SD)

	T1	T2	Cohen's d	95%ICC
5JT (m)	11.09 (1.22)	12.24 (0.67)**	0.61	-2.17/4.47
10m (s)	1.90 (0.10)	1.83 (0.11)**	0.33	-0.19/0.05
30m (s)	4.51 (0.18)	4.40 (0.22)**	0.28	-0.25/0.03
YYIER (m)	1783 (323)	2716 (564)**	1.05	93/1773
YYIRT (m)	940 (277)	2173 (308)**	2.11	446/2554

Significant differences: *: $p < 0.05$; **: $p < 0.001$

Table 3.Anthropometric characteristics of the youth soccer players during one season, according to their playing positions.(mean \pm SD)

	Height				Weight				Fat mass			
	(cm)				(kg)				(%)			
	T1	T2	Cd	95%ICC	T1	T2	Cd	95%ICC	T1	T2	Cd	95%ICC
GB	183.3 (3.5)	185.3 (3.2) **	0.30	1.0/3	78.00 (5.0)	76.90 (3.3)	0.14	1.38/5.78	14.18 (1.5)	13.19 (2.4)	0.25	-6.65/4.67
DEF	176.6 (4.4)	179.4 (4.2) **	0.33	-1.3/6.9	69.80 (4.6)	68.6 (4.5)	0.13	3.26/4.06	12.45 (3.6)	11.56 (2.3)	0.15	-5.97/4.19
FB	176.2 (2.9)	179.9 (3.6) **	0.57	1.46/5.94	67.30 (3.8)	67.00 (1.9)	0.05	-5.16/3.56	12.38 (3.1)	10.75 (2.4)	0.16	-4.43/1.7
MF	175.3 (4.2)	178.7 (3.7) **	0.43	2.0/4.8	64.70 (4.1)	65.50 (4.2)	0.10	-6.4/4.8	10.55 (3.1)	10.09 (1.9)	0.09	-4.36/3.24
FW	173.9 (3.3)	177.2 (2.9) **	0.53	1.48/5.12	68.30 (6.6)	68.4 (7.3)	0.01	-6.3/6.5	12.27 (3.5)	10.57 (1.9)*	0.31	-5.96/2.56

Cd : Cohen's d Significant differences: *: $p<0.05$; **: $p<0.001$

Table 4.Physical fitness characteristics of the youth soccer players during one season, according to their playing positions. (mean \pm SD)

	GB	DEF	FB	MF	FW
5-JT (m)					
T1	11.16 (1.0)	10.83 (1.4)	11.12 (1.4)	11.39 (1.4)	11.05 (0.8)
T2	12.10 (0.6)*	12.32 (0.9)**	12.20 (0.7)*	12.19 (0.8)*	12.34 (0.4)**
Cohen's d	0.59	0.65	0.56	0.37	1.07
95%ICC	-0.08/1.96	-0.25/3.23	-1.22/3.38	-0.64/2.44	-0.15/2.73
30m Sprint (s)					
T1	4.63 (0.2)	4.49 (0.3)	4.49 (0.2)	4.47 (0.2)	4.46 (0.2)
T2	4.52 (0.2)**	4.41 (0.2)**	4.37 (0.3)**	4.35 (0.3)**	4.36 (0.1)**
Cohen's d	0.27	0.16	0.24	0.24	0.33
95%ICC	-0.29/0.07	-0.20/0.04	-0.40/0.06	-0.26/0.02	-0.24/0.04
YYIER (m)					
T1	1480 (341)	1733 (477)	1880 (284)	1712 (267)	2040 (134)
T2	1720 (0)**	2986 (463)**	2860 (241)**	2768 (339)**	3106 (220)**
Cohen's d	0.70	1.33	1.87	1.74	3.01
95%ICC	-542/1022	1161/1345	733/1453	610/1122	773/1653
YYIRT (m)					
T1	650 (420)	896 (131)	1146 (166)	1133 (23)	1000 (174)
T2	1840 (311)**	2112 (303)**	2360 \pm 80**	2346 (244)**	2360 (174)**
Cohen's d	1.63	2.80	4.97	4.54	3.90
95%ICC	-130/2730	694/1906	520/1760	112/3060	638/2802

Significant differences: *: $p < 0.05$; **: $p < 0.001$

ARTICLE 2

Journal of Sports Sciences, 2012; 1–8, iFirst article



Effects of a soccer season on anthropometric characteristics and physical fitness in elite young soccer players

MOHAMED ALI HAMMAMI¹, ABDERRAOUF BEN ABDERRAHMANE²,
AMMAR NEBIGH³, EMMERAN LE MOAL¹, OMAR BEN OUNIS⁴, ZOUHAIR TABKA⁴, &
HASSANE ZOUHAL¹

¹Movement, Sport and Health Sciences Laboratory, Rennes 2 University - ENS Cachan, UFR APS, Rennes, France, ²Institut Supérieur du Sport et de l'Éducation Physique de Tunis, Ksar Said, University of Manouba, ISSEP, Tunis, 2091 Tunisia,

³Laboratoire des Adaptations Cardio-Circulatoires, Respiratoires, Métaboliques et Hormonales à l'Exercice Musculaire, Faculté de Médecine Ibn El Jazzar, 4002 Sousse, Sousse, Tunisia, and ⁴Faculty of Medicine, Physiology, Avenue Mohamed Karoui, Sousse, 4000 Tunisia

(Accepted 28 October 2012)

Abstract

The aim of this study was to evaluate the effect of a soccer-training season on the anthropometric and performance characteristics of elite youth soccer players.

Two groups (age: 14.4 years) participated in this study: 1) 24 soccer players training 8 to 10 hours per week and 2) 26 non-athletic boys used as controls. Anthropometric measurements, aerobic (Yo-Yo Intermittent Recovery test level 1) and anaerobic (counter-movement-jump (CMJ), squat-jump (SqJ), five-jump-test (5JT), and speed (T5m, 10 m, 30 m)) performances were assessed twice during 8 months (T0: October; T1: May) of the competitive season.

Data showed significant differences in height and weight at T0 between the two groups ($P < 0.05$), while no difference in the percentage of body fat (%BF) was observed. However, the soccer players were significantly taller and had lower %BF than age-matched controls at T1.

Compared to the controls, the soccer players attained better results in the physical fitness test ($P < 0.05$) at T0 and T1 except in (T5m) sprinting speed. Hence, significant improvements ($P < 0.05$) in physical parameters were observed between T0 and T1 only in soccer players.

The results demonstrate that soccer-training season was able to provide maturation free improvement in anthropometric and performance characteristics in young soccer players during the training season.

Keywords: performance indicators, development, elite youth academy, regular training soccer

Introduction

Association football, more commonly referred to as soccer is the most popular sport in the world, especially among children (Malina, Eisenmann, Cumming, Ribeiro, & Aroso, 2004; Malina et al., 2000; Reilly, Bangsbo, & Franks, 2000). It consists of intermittent high-intensity exercises that involve various types of runs with rapid changes of directions, starts, stops, jumps and kicks (Alfredson, Nordström, & Lorentzom, 1996). This activity requires well-developed physical fitness to be successfully played (Castagna, Manzi, Impellizzeri, Weston, & Barbero Alvarez, 2010). Many factors are involved in the identification of talent and

training of young soccer players, such as technical, tactical, physical fitness and anthropometrical characteristics (Reilly, Williams, Nevill, & Franks, 2000). In this regard, at the elite level, coaches are persistently searching for the most successful methods for identifying and developing talented young soccer players. Currently, recognition of the role of the youth academy is vital in the long-term development of soccer players. The supposed role of teams' academies is to act as centres for selection and development of prospective young soccer players. The huge economical and human resource investment for this process requires objective methods for talent selection and development (Francisco, Martín, & Gallego, 2011).

Correspondence: Hassane Zouhal, University of Rennes 2, UFRAPS Movement Sport and Health Sciences Laboratory, Av Charles Tillon Campus La Harpe, Rennes, 35850 France. E-mail: hassane.zouhal@univ-rennes2.fr

ISSN 0264-0414 print/ISSN 1466-447X online © 2012 Taylor & Francis
<http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2012.746721>

2 M. A. Hammami et al.

In the attempt to perform an objective evaluation of the young soccer players' potential, the anthropometrical and physical profile results are of interest. Indeed the selection process should be performed as early as possible and consequently often occurs during a developmental stage in prospective players and is affected by maturation.

Studies that addressed youth soccer showed that players were taller (Gil, Ruiz, Irazusta, Gil, & Irazusta, 2007) and skeletally more mature (Malina et al., 2000) compared to their chronological age counterparts. These researches revealed height, sprint time, ego orientation and anticipation skill as the most discriminating variables between young players of different competitive levels (Malina et al., 2004; McMillan, Helgerud, Macdonald, & Hoff, 2005; Reilly et al., 2000). Similarly, a recent longitudinal study examined changes in anthropometric parameters and in physical fitness for regional youth soccer players during a two year monitoring period compared with controls. The results showed that the physical fitness of regional soccer players was better than the control groups (Väntinen, Blomqvist, Nyman, & Häkkinen, 2011).

Furthermore, training studies showed that in prepubescent children, physical capacity may be successfully enhanced (Baquet et al., 2002; Obert, Mandigout, Vinet, & Courteix, 2001; Williams, Armstrong, & Powell, 2000). However, little information is currently available on the effect of pubertal training on the anthropometrical and physical performance of young elite soccer players in a youth academy (Le Gall, Carling, Williams, & Reilly, 2010). This research would be of importance to clarify the role of training as intervention to positively affect anthropometric and physical performances in prospective elite young soccer players.

Therefore, the aim of this study was to evaluate the development of anthropometric and performance characteristics in elite youth soccer players during a soccer-training season compared to age-matched controls not participating in soccer or regular training beyond compulsory physical education at school. The study hypothesis assumed soccer training to be a covariate of physical and anthropometrical development in young elite soccer players.

Methods

Participants

Fifty boys were recruited to participate in our study. Twenty-four (age 14.5 ± 0.4 years) were resident in the youth academy of elite soccer players (Borj Cedria, Tunisia) and were members of the Tunisian national Under 16 (U16) team and constituted the

soccer group. This group of elite players was selected from six regional centres of football throughout Tunisia. The first selection from these centres was done among 800 young male soccer players. The criteria used for selection, is based on technical tests and physical fitness parameters.

They practised soccer 11 months a year, for at least 5 years at a rate of 5 sessions with one competitive game per week, in addition to their school physical education.

In general, soccer training sessions lasted ~ 1 h 30 min, including about 15–20 min of warming up, low-intensity games and stretching exercises, 15–25 min of technical soccer exercises (kicking actions, dribbling, jumping, and running with fast accelerations and decelerations), 20–30 min of match practice, and 10 min of active recovery.

The other 26 participants (age 14.3 ± 0.3 years), were assigned to the control group (non-athletic boys). They participated only in the compulsory physical education curriculum at school (two weekly sessions of 50 min.). They were randomly chosen and were representative of the general population.

Experimental procedure

The soccer players and control participants were evaluated during two time-points in the training season respectively; first, at baseline, at the start of a preparatory period (T0) in October 2008 for the two groups; second, 8 months later in May 2009 (T1), the end period of the competitive season; we performed the same tests for the soccer players and the controls.

Anthropometry characteristics

Each participant came to the laboratory for a medical examination and anthropometric measurements performed by a paediatrician before and after the soccer season period.

Body height and weight were measured with standard techniques to the nearest 0.1 cm and 0.1 kg, respectively for each participant. To estimate the adiposity, skinfold thickness was measured at four sites on the left-side of the body (triceps, biceps, subscapular and suprailiac) using a Harpenden skinfold calliper (British Indicators Ltd., Luton) for calculation of per cent body fat according to the equations described by Durnin and Webster (1985). All measurements were taken in the morning at 7h30 by the same investigator at each period (T0 and T1).

Puberty stage assessment

The puberty stage was the indicator of biological maturity status. It was determined and recorded by a

paediatrician experienced in the assessment of secondary sex characteristics according to the method of Tanner (1975). Children at pubertal development stages 1–5 were evaluated. At the beginning of the study, according to their pubescent status, the young soccer players and the control group belonged to Tanner stage (2–3).

Physical fitness characteristics

Vertical jumping. Each participant performed three kinds of maximal jump, including the squat-jump (SqJ), starting with knees bent at 90° and without previous counter movement and the counter-movement-jump (CMJ), starting from a standing position allowing for counter movement with the intention of reaching knee bending angles of around 90° just before propulsion. The ground reaction forces generated during these vertical jumps were estimated with an ergo jump (Opto Jump Microgate, Italy).

In addition, the participants performed a five-jump-test (5JT). Each player performed 3 SqJ, 3 CMJ and 3 5JT interspersed with 1-min rest in-between, and the best (highest) jump of each type was used for analysis (Chamari et al., 2008).

Running speed test. The participants performed three maximal 30-m sprints (with 5- and 10-m split times) measured with an infrared photoelectric cell (Cell Kit Speed Brower, USA). During the 3-minute recovery periods in-between, the participants walked back to the starting line and then waited for the next sprint. The participants commenced the sprint when ready from a standing start 0.5 m behind the first timing gate. Stance for the start was consistent for all participants. The best (fastest) 30 m sprint time and the associated 5- and 10-m split time were selected for analysis.

The results show that these tests were highly repeatable: 5-m sprint, intra-class correlation (ICC) = 0.97; 10-m sprint, ICC = 0.97; 30-m sprint, ICC = .96; SqJ, ICC = 0.93; CMJ, ICC 0.90; 5JT, ICC = 0.89.

Yo-Yo intermittent recovery test level-1 performance. The Yo-Yo intermittent recovery test level-1 (YYIRT1) was used to estimate maximum oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$). Based on the equation from Bangsbo, Iaia, and Krstrup (2008) whereby: $\dot{V}O_{2max}$ ($ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) = $YYIRT1 \text{ distance (m)} \cdot 0.0084 + 36.4$. Briefly, the YYIRT1 consists of repeated 2 × 20 m runs back and forth between the starting, turning, and finishing line at a progressively increased speed controlled by an audio metronome from a calibrated CD player. The participants had a 10-s active rest period (decelerating and walking back to the starting line) between

each running bout. When a participant failed twice to reach the finishing line in time, or decided that he could no longer run at the imposed pace, the total distance covered was recorded. All tests were made by the same investigators, scheduled at the same time of day, carried out in the same order and using the same apparatus at each period (T0 and T1).

Statistical analysis

Results are expressed as means \pm standard deviations (*s*). Significant differences were assumed when $P < 0.05$. The data were analysed by using SPSS for Windows (version 16.0; SPSS Inc, Chicago). All variables used in the study were checked for normality of distribution before the analyses, Kolmogorov-Smirnov tests were used for each variable. A two way repeated measures analysis of variance (ANOVA) (2x2) was performed to determine if significant differences existed between groups (soccer players and controls) and testing (T0 and T1). If significant main effects or interactions were present a Bonferoni post hoc analysis was conducted.

The correlations between independent variable namely height, weight and physical performances were determined by simple regression. The reliability of each test was assessed by intra-class correlations (ICCs).

Results

The anthropometric characteristics of the participants are presented in Table I. Analysis revealed a significant main effect of time ($P < 0.001$) and group ($P < 0.001$) for height, weight and percentage of body fat (%BF). A significant (group × time) interaction effect ($P < 0.001$) was observed. This interaction mainly concerned height and weight. Statistically significant differences were found between the young male players and the controls concerning height ($P < 0.05$) and weight ($P < 0.05$) at T0, while no difference in the percentage of body fat (%BF) was apparent. Additionally, the soccer players showed significant differences from controls in height and in weight at T1 as well ($P < 0.05$), with soccer players being significantly taller and heavier.

ANOVA indicated a significant main effect of time for all physical measurements from T0 to T1 within groups ($P < 0.001$) except for speed for 5 and 30 m. Also, the statistical analysis revealed a significant main effect of group ($P < 0.000$) for all dependant variables. No significant interaction (group × time) was observed for 5- and 10-m sprints. As shown in Table II, compared to the controls at T0, the soccer players attained better results in the physical fitness tests (counter-movement-jump, squat-jump and

4 M. A. Hammami et al.

five-jump-test ($P < 0.05$), and in estimated $\dot{V}O_{2max}$ ($P < 0.05$), except in (T5m) sprinting speed. Similarly, the same differences were observed between two groups at T1, except in (T5m) sprinting speed.

Except in squat-jump test and in (T5m) sprinting speed, the young soccer players have statistically significant differences in physical parameters between T0 and T1 ($P < 0.05$). However, no significant differences were demonstrated in all fitness performances in control participants.

Table III shows that weight was significantly correlated with squat-jump ($r = 0.3$, $P < 0.05$) and YYIRTL1 distance ($r = 0.30$, $P < 0.01$). Height was significantly correlated with five-jump-test ($r = 0.4$, $P < 0.01$), counter-movement-jump ($r = 0.3$, $P < 0.05$), squat-jump ($r = 0.3$, $P < 0.01$) and 30-m sprint time ($r = -0.4$, $P < 0.01$). However, no significant correlations were found between

anthropometric and physical performances for control participants.

Regression analysis showed significant correlations between counter-movement-jump, squat-jump and five-jump-test with Yo-Yo intermittent recovery test (level-1) for young soccer players compared to control participants throughout T0 and T1.

Especially the height jumped, a specific physical quality in soccer, showed the highest correlation with Yo-Yo intermittent recovery test (level-1) ($r = 0.6$, $P < 0.05$) at T0 for the soccer players compared to the controls. However, no significant relationship was observed between these physical parameters for the control group (Table IV).

Finally, the total distance covered during the Yo-Yo intermittent recovery test (level-1) increased significantly from T0 to T1 in the soccer players versus control participants ($P < 0.05$) (Figure 1).

Table I. Anthropometric characteristics of soccer players and controls determined at the beginning of the season (T0) and after 8 months (T1). Data presented as means \pm s.

Variables	Controls (n = 26)			Soccer players (n = 24)			§ soccer players vs. controls		Interaction (Sig.)
	T0	T1	#	T0	T1	#	T0	T1	
Height (cm)	168 \pm 8.9	169 \pm 7.5	1 n.s.	175.6 \pm 4.5	178.8 \pm 4.1	3.2*	7.6*	9.8*	0.001
weight (kg)	52.5 \pm 12.1	53.6 \pm 6.1	1.1 n.s.	70.1 \pm 5.9	67.7 \pm 5.6	2.4 n.s.	17.6*	14.1*	0.001
%BF	14.3 \pm 2.3	12.5 \pm 2.7	-1.8 n.s.	13.3 \pm 2.8	11.8 \pm 2.6	-1.5 n.s.	1 n.s.	0.7 n.s.	0.116

§: Differences between soccer players versus controls

#: Differences between T0 and T1.

vs.: versus

%BF: Percentage of body fat.

n.s.: not significant, *significant at $P < 0.05$.

Table II. Fitness measurements for soccer players and control participants determined at the beginning of the season (T0) and after 8 months (T1). Data presented as means \pm s.

Variables	Controls (n = 26)			Soccer players (n = 24)			§ soccer players vs. controls		Interaction (Sig.)
	T0	T1	#	T0	T1	#	T0	T1	
CMJ	25.9 \pm 5.1	26.1 \pm 4.1	0.2 n.s.	31.2 \pm 4.1	34.5 \pm 4.4	3.3*	5.3*	8.4*	0.019
SqJ	25.1 \pm 4.8	27.3 \pm 3.6	2.2 n.s.	29.1 \pm 3.6	32.3 \pm 3.7	2.4 n.s.	4.0*	5.0*	0.005
5JT	8.6 \pm 1.2	9.6 \pm 0.6	1.0 n.s.	10.3 \pm 0.7	11.9 \pm 0.5	1.6*	1.7*	2.3*	0.001
T5m	1.3 \pm 0.1	1.3 \pm 0.5	0.0 n.s.	1.2 \pm 0.1	1.2 \pm 0.1	-0.0 n.s.	-0.1 n.s.	-0.1 n.s.	0.420
T10m	2.1 \pm 0.2	2.2 \pm 0.6	0.1 n.s.	2.0 \pm 0.1	1.9 \pm 0.1	-0.1*	-0.1*	-0.3*	0.210
T30m	5.3 \pm 0.3	5.2 \pm 0.1	-0.1 n.s.	4.6 \pm 0.2	4.5 \pm 0.2	-0.1*	-0.7*	-0.7*	0.003
VO2max	46.1 \pm 1.4	47.2 \pm 2.7	1.1 n.s.	47.9 \pm 1.9	55.7 \pm 2.2	7.8*	1.8*	8.5*	0.001

Data are means \pm s. CMJ: counter-movement-jump (cm); SqJ: squat-jump (cm); 5JT: five-jump-test (m); T5m: time in 5 m (s); T10m: time in 10 m (s); T30m: time in 30 m (s); VO2max: maximum oxygen uptake ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$).

§: Differences between soccer players versus controls

#: Differences between T0 and T1.

vs.: versus

n.s.: no significant, *significant at $P < 0.05$.

Table III. Correlations between anthropometric characteristics and physical performances from the soccer players and the controls.

Variables	Soccer players (n = 24)		Controls (n = 26)
	Physical performances	(r)	(r)
Weight	5JT (m)	0.04	0.2
	CMJ (cm)	0.2	0.2
	SqJ (cm)	0.3*	0.04
	T30m (s)	-0.04	-0.2
	T10m (s)	-0.1	-0.2
	YYIRTL1	0.3**	0.2
Height	5JT (m)	0.4**	0.2
	CMJ (cm)	0.3*	0.1
	SqJ (cm)	0.3**	0.2
	T30m (s)	-0.4**	-0.2
	T10m (s)	-0.10.1	-0.1
	YYIRTL1		0.1

5JT: five-jump-test (m); CMJ: counter-movement-jump (cm); SqJ: squat-jump (cm); T30m: time in 30 m (s); T10m: time in 10m (s); YYIRTL1: Yo-Yo intermittent recovery test (level-1). * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

Discussion

In the present study, anthropometric and physical fitness parameters profiles of highly trained pubescent soccer players were compared to control participants. Better performance was demonstrated on many of the anthropometric and fitness measures across the two time-points in young soccer players compared to control participants during one season in a youth academy. Furthermore, our results showed that anthropometric parameters and physical fitness change during a one-season training programme in pubescent soccer players.

For height, a significant increase was observed in the elite pubescent players but not in the control group from T0 to T1. Our results support the idea that sport has beneficial effects on growth (Cacciari et al., 1990; Jurickay & Mezey, 1994; Nikoladis & Karidis, 2011) and agree with previous studies that reported that young soccer players were taller (Gil et al., 2007) and skeletally more mature (Malina et al., 2000) compared to their chronological age counterparts (Nebigh et al., 2009). Also, our results were in agreement with those of Carling and colleagues (Carling, Le Gall, Reilly, & Williams, 2009) who observed a significant difference concerning the stature in elite, under-14 (U14) youth academy soccer players.

In the present investigation, a substantial difference was also observed in weight between the young players and control participants in T0 and T1. In the soccer group, weight decreases significantly from T0 to T1, whereas no significant change is noted in the

Table IV. Correlations between physical performances (5JT, CMJ, SqJ) and YYIRTL1 for soccer players and control participants.

Variables	YYIRTL1	
	Soccer players (n = 24)	Controls (n = 26)
T (0)	(r)	(r)
CMJ(cm)	0.2 *	0.2
SqJ(cm)	0.2 *	0.1
5JT(m)	0.6 *	0.2
T (1)		
CMJ(cm)	0.3 *	0.3
SqJ(cm)	0.3 *	0.1
5JT(m)	0.5 *	0.2

CMJ, counter-movement-jump (cm); SqJ, squat-jump (cm); 5JT, five-jump-test; YYIRTL1, Yo-Yo intermittent recovery test (level-1).

* $P < 0.05$.

control group. The training programme can mainly explain this decrease during the period between T0 and T1 observed in this group in the youth academy (Vicente-Rodriguez et al., 2003).

The higher weight observed in the soccer group at T0 can be explained, at least in part, by a long recovery period after which the first measurements were made in October. The pubescent players were likely to be "overweight" due to no food restriction and to low level of training. Thus, after the training season starts again, the soccer players lose excess weight. Our data support the idea that young soccer players are heavier than the controls who were never engaged in regular physical activity (Baxter-Jones, Goldstein, & Helms, 1993).

Our results are superior to those collected by Da Silva and colleagues (Da Silva, Bloomfield, & Bouzas Marins, 2008) in their recent review of Brazilian soccer players whereas the weight was similar. These discrepancies can mainly be explained by differences in talent identification and development of young soccer players between the Brazilian and Tunisian Football Federations. However, the anthropometric values in the present study were similar to the findings reported by Le Gall et al. (2010), when they examined the anthropometric profile and fitness measures in elite French players who successfully attained international level compared to players who remained amateur.

Our findings are also in agreement with data from cross-sectional and longitudinal studies, which reported that young soccer players had lower weight, and larger height compared to their chronological age counterparts (Gil et al., 2007; Reilly et al., 2000).

In the present study, significant increases in the fitness measures were only observed in elite young soccer players compared to control participants

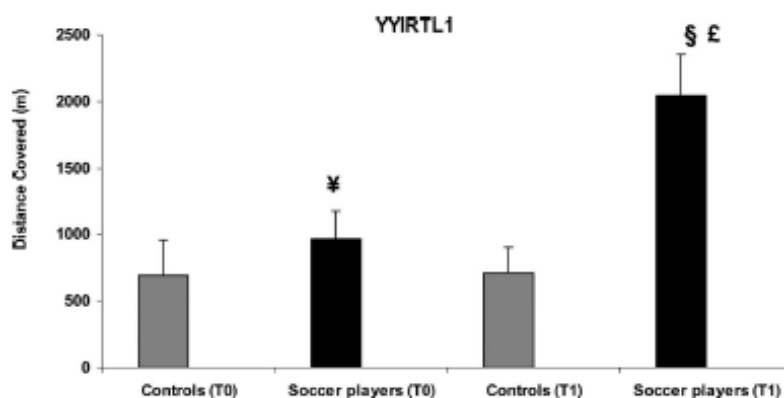


Figure 1. Distance covered on the YYIRTL1 of soccer players and control participants at the beginning of the season (T0) and after 8 months (T1). ¥: significant differences at T0 between soccer players and controls, $P < 0.05$. §: significant differences between T0 and T1 for soccer players only, $P < 0.05$. £: significant differences at T1 between soccer players and controls, $P < 0.05$. YYIRTL1: Yo-Yo intermittent recovery test (level-1).

during the 8-month study period. The type of training during this year in this youth academy, where participants performed a strength and conditioning programme several times per week, can explain these increases.

In our study, the soccer players had better performances in fitness measures than the controls. These players had significantly greater jump height (in counter-movement-jump, squat-jump and five-jump-test), predicted $\dot{V}O_{2\max}$, and were faster in 10 m and 30 m time compared with the control participants. Therefore, the superior performances resulting from significant differences in fitness parameters may be promoted by high-training and regular soccer competition in boy players.

The counter-movement-jump, squat-jump and five-jump-test are reliable tests for evaluating the ability to achieve high muscular power in lower limbs, which is of great importance in a soccer team (Chamari et al., 2008). Regarding muscular power, our data are in agreement with a previous study that mentioned significant superiority in vertical jump performance of youth soccer players (Malina et al., 2004; Wong, Chamari, Dellal, & Wisløff, 2009). Hence, our results support several studies, which have shown that the five-jump-test can be an efficient test for evaluating lower limb explosiveness in selected athletes and in elite-level male soccer players (Chamari et al., 2008; Chtara et al., 2005; Coutts et al., 2007; Spurr, Murphy, & Watsford, 2003).

In this study, young soccer players were faster in 10 m and 30 m sprinting speed compared with the control participants after 8 months of soccer training. These results can, at least in part, be explained by reference to the anthropometric characteristics. In fact, Wong and colleagues demonstrate that body height was significantly correlated with 10 m

and 30 m sprint times and body mass was significantly correlated with 30 m sprint time (Wong et al., 2009).

These performances are lower than those found in the literature according to sprint performance for 10 m for youth soccer players (Chamari et al., 2004; Le Gall, Beilo, & Rochcongar, 2002) but better than McMillan et al.'s (2005) results. The performances for 30 m are inferior to those found by Chamari et al. (2004) in young soccer players who trained under the same conditions as the present soccer players.

This can be explained by the fact that the programme recommended by the Tunisian Football Association for young elite soccer players in the youth academy was focused on the technical and aerobic training during the first year. It was the period of the experiment of the present study. Otherwise, in the second year, in addition to developing technical skills and aerobic potential, the training programme was based on the development of strength and sprint training.

One of the main findings of the present study was the difference in the estimated maximum oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) and in the Yo-Yo intermittent recovery test (level-1) total distance covered between soccer players and controls at T0 and T1. The $\dot{V}O_{2\max}$ values estimated at T1 for soccer players are similar to those reported in some studies (Da Silva et al., 2008; Le Gall et al., 2002; Wong et al., 2009), but better than those reported by Markovic and Mikulic (2011) in young soccer players. Our results showed a significant increase of the estimated $\dot{V}O_{2\max}$ and the total distance covered during the Yo-Yo intermittent recovery test (level-1) after 8 months of soccer training. This can be explained by the initial level of our soccer players, which was low due to the reduction of training after the end of the

last season. The training intensity to which these athletes were exposed throughout the training period exerted its beneficial effect on growth in aerobic power, leading to a positive net effect.

These results are similar to those reported by Vääntinen et al. (2011) who reported in a recent longitudinal study that physical fitness of regional soccer players was better than the control groups in all age groups, especially in cardiovascular endurance and in agility during a two-year monitoring period.

Our study illustrates the correlations between anthropometric characteristics and physical fitness. The relationship was more pronounced in soccer players than in controls. The results show that in young soccer players the weight was significantly related to the performances in squat-jump and Yo-Yo intermittent recovery test (level-1) distance, while taller players performed better in five-jump-test, counter-movement-jump, squat-jump and in 30 m sprint. In the same way, in the study of Malina et al. (2000), it was suggested that weight is the most significant predictor of 30 m sprint performance and height is the most significant predictor of vertical jump performance in elite Portuguese youth soccer players aged from 11 to 16 years.

Especially the height jumped, a specific physical quality in soccer, showed the better relationships with Yo-Yo intermittent recovery test (level-1) at T0 and T1, for the soccer players compared to the controls.

In agreement with this, a previous study showed a significant correlation between counter-movement-jump and Yo-Yo intermittent recovery test (level-1) performance, which suggests that pliometric maximal power, influences the Yo-Yo intermittent recovery test (level-1) performance in young elite soccer players (Castagna, Impellizzeri, Chamari, Carlomagno, & Rampinini, 2006). Thus, it is possible that the gain of power may explain, at least in part, the gain of performance during the Yo-Yo intermittent recovery test (level-1).

Conclusion

In summary, regular soccer training allows the improvement of anthropometric parameters and physical performance of young elite soccer players in one soccer season compared to age-matched controls. During this pubescent period, the enhancement was found in the soccer players group and also between the soccer players and the control participants. Following a longitudinal follow-up during one soccer season, the training programme can explain the better performances observed in young elite soccer players compared with age matched-controls.

References

- Alfredson, H., Nordström, P., & Lorentsen, R. (1996) Total and regional bone mass in female soccer players. *Calcified Tissue International*, 59, 438-442.
- Bangbo, J., Iaia, F. M., & Krstrup, P. (2008) The Yo-Yo intermittent recovery test: A useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. *Sports Medicine*, 38, 37-51.
- Baquet, G., Berthon, S., Dupont, G., Blondel, N., Fabre, C., & Van Praagh, E. (2002). Effects of high intensity intermittent training on peak $\dot{V}O_2$ in prepubertal children. *International Journal of Sports Medicine*, 23, 439-444.
- Baxter-Jones, A., Goldstein, H., & Helms, P. (1993). The development of aerobic power in young athletes. *Journal of Applied Physiology*, 75, 1160-1167.
- Cacciari, E., Mazzanti, L., Tassinari, D., Bergamaschi, R., Magnani, C., Zappulla, F., ... Pini, R. (1990). Effects of sport (football) on growth: Auxological, anthropometric and hormonal aspects. *European Journal of Applied Physiology*, 61, 149-158.
- Carling, C., Le Gall, F., Reilly, T., & Williams, A. M. (2009). Do anthropometric and fitness characteristics vary according to birth date distribution in elite youth academy soccer players? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 19, 3-9.
- Castagna, C., Impellizzeri, F. M., Chamari, K., Carlomagno, D., & Rampinini, E. (2006). Aerobic fitness and Yo-Yo continuous and intermittent tests performances in soccer players: A correlation study. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20, 320-325.
- Castagna, C., Manzi, V., Impellizzeri, F., Weston, M., & Barbero Alvarez, J. C. (2010). Relationship between endurance field tests and match performance in young soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24, 3227-3233.
- Chamari, K., Chaouachi, A., Hambli, M., Kaouch, F., Wisloff, U., & Castagna, C. (2008). The five-jump test for distance as a field test to assess lower limb explosive power in soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22, 944-950.
- Chamari, K., Hachana, Y., Ahmed, Y. B., Galy, O., Sghaier, F., Chatard, J.-C., ... Wisloff, U. (2004). Field and laboratory testing in young elite soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 38, 191-196.
- Chana, M., Chamari, K., Chaouachi, M., Chaouachi, A., Koubaa, D., Feki, Y., ... Amri, M. (2005). Effects of intra-session concurrent endurance and strength training sequence on aerobic performance and capacity. *British Journal of Sports Medicine*, 39, 555-560.
- Coutts, A. J., Slatery, K. M., & Wallace, L. K. (2007). Practical tests for monitoring performance, fatigue and recovery in triathletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 10, 372-381.
- Da Silva, C. D., Bloomfield, J., & Bouzas Martins, J. C. (2008). A review of stature, body mass and maximal oxygen uptake profiles of U17, U20 and first division players in Brazilian soccer. *Journal of Sports Science and Medicine*, 7, 309-319.
- During, J. V., & Webster, C. I. (1985). *A new method of assessing fitness and desirable weight for use in the Armed Services Army department*, Technical Report: Ministry of Defence.
- Francisco, J., Martín, L., & Gallego, A. C. (2011). Deficits of accounting in the valuation of rights to exploit the performance of professional players in football clubs. A case study. *Journal of Management Control*, 22, 335-357.
- Gil, S., Ruiz, F., Irazusta, A., Gil, J., & Irazusta, J. (2007) Selection of young soccer players in terms of anthropometric and physiological factors. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 47, 25-32.
- Juriskay, Z., & Mezey, M. (1994). Effet d'une formation régulière sur les paramètres anthropométriques et les stéroïdes urinaires dans l'enfance [Effect of regular training on the anthropometric parameters and urine steroids in childhood]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 68, 367-72.

8 M. A. Hammami et al.

- Le Gall, F., Beillot, J., & Rochcongar, P. (2002). The improvement in maximal anaerobic power of soccer players during growth. *Science and Sports*, 17, 177-188.
- Le Gall, F., Carling, C., Williams, M., & Reilly, T. (2010). Anthropometric and fitness characteristics of international, professional and amateur male graduate soccer players from an elite youth academy. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13, 90-95.
- Malina, R. M., Eisenmann, J. C., Cumming, S. P., Ribeiro, B., & Aroso, J. (2004). Maturity-associated variation in the growth and functional capacities of youth football (soccer) players 13-15 years. *European Journal of Applied Physiology*, 91, 555-562.
- Malina, R. M., Peña Reyes, M. E., Eisenmann, J. C., Horta, L., Rodrigues, J., & Müller, R. (2000). Height, mass and skeletal maturity of elite Portuguese soccer players aged 11-16 years. *Journal of Sports Sciences*, 18, 685-693.
- Markovic, G., & Milalic, P. (2011). Discriminative ability of the yo-yo intermittent recovery test (level 1) in prospective young soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25, 2931-2934.
- McMillan, K., Helgerud, J., Macdonald, R., & Hoff, J. (2005). Physiological adaptations to soccer specific endurance training in professional youth soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 39, 273-277.
- Nebigh, A., Rebai, H., Elloumi, M., Bahlous, A., Zouch, M., Zaouali, M.,... Tabka, Z. (2009). Bone mineral density of young boy soccer players at different pubertal stages: Relationships with hormonal concentration. *Joint Bone Spine*, 76, 63-69.
- Nikoladis, P., & Karidis, N. (2011). Physique and body composition in soccer players across adolescence. *Asian Journal of Sports Medicine*, 2, 75-82.
- Obert, P., Mandigout, S., Vinet, A., & Courteix, D. (2001). Effect of aerobic training and detraining on left ventricular dimensions and diastolic function in prepubertal boys and girls. *International Journal of Sports Medicine*, 22, 90-96.
- Reilly, T., Bangsbo, J., & Franks, A. (2000). Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *Journal of Sports Sciences*, 18, 669-683.
- Reilly, T., Williams, A. M., Nevill, A., & Franks, A. (2000). A multidisciplinary approach to talent identification in soccer. *Journal of Sports Sciences*, 18, 695-702.
- Spurrs, R. W., Murphy, A. J., & Watsford, M. L. (2003). The effect of plyometric training on distance running performance. *European Journal of Applied Physiology*, 89, 1-7.
- Tanner, J. M. (1975). Growth endocrinology of the adolescent. In L. Gardner (Ed.), *Endocrine genetic diseases of childhood and adolescence* (pp. 14-64). Philadelphia, PA: W. B. Saunders.
- Vänttinen, T., Blomqvist, M., Nyman, K., & Häkkinen, K. (2011). Changes in body composition, hormonal status and physical fitness in 11, 13 and 15 year old Finnish regional youth soccer players during a two year follow-up. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25, 3342-3351.
- Vicente-Rodriguez, G., Jimenez-Ramirez, J., Ara, I., Serrano-Sanchez, J. A., Dorado, C., & Calbet, J. A. (2003). Enhanced bone mass and physical fitness in prepubescent footballers. *Bone*, 33, 853-859.
- Williams, C. A., Armstrong, N., & Powell, J. (2000). Aerobic responses of prepubertal boys to two modes of training. *British Journal of Sports Medicine*, 34, 168-173.
- Wong, P. L., Chamari, K., Dellal, A., & Wisloff, U. (2009). Relationship between anthropometric and physiological characteristics in youth soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23, 1204-1210.

ARTICLE 3

PHYSICAL AND HORMONAL CHANGES WITH INTENSE EXERCISE TRAINING IN YOUNG ATHLETES

HAMMAMI M.A.^{1, 2,3}, BEN ABDERRAHMAN A.^{1,2,4}, NEBIGH A.³, BEN OUNIS O.^{2,3},
TABKA Z.³, ZOUHAL H.¹

¹ *Movement, Sport and Health Sciences Laboratory (M2S), UFR-APS, University of Rennes 2-ENS Cachan, Rennes, France.*

² *Institut Supérieur du Sport et de l'EPS de Tunis. Ksar Saïd, University of Manouba Tunisie.*

³ *Laboratory of Physiology and Functional Explorations, Ibn Eljazzar Faculty of Medicine, University of Sousse, Tunisia.*

⁴ *"Sport Performance Optimization" National Center of Medicine & Science in Sport (CNMSS), Tunis, Tunisia.*

Corresponding author: Professor H. ZOUHAL

Movement, Sport and Sciences laboratory (M2S).UFR-APS, University of Rennes

2, Avenue Charles Tillon, CS 24414, 35044 Rennes Cedex, France.

Phone number: +33.2.99.14.17.75.

Fax number: +33.2.99.14.17.74

E-mail: hassane.zouhal@univ-rennes2.fr

Medicine & Science in Sports & Exercise
PHYSICAL AND HORMONAL CHANGES WITH INTENSE EXERCISE TRAINING IN
YOUNG ATHLETES
 –Manuscript Draft–

Manuscript Number:	
Full Title:	PHYSICAL AND HORMONAL CHANGES WITH INTENSE EXERCISE TRAINING IN YOUNG ATHLETES
Short Title:	Intense training in elite young athletes
Article Type:	Original Investigation
Keywords:	Performance testing, body composition, insulin-like growth factor-1, insulin-like growth factor binding protein-3, growth hormone
Corresponding Author:	Hassane Zouhal, PhD, HDR Movement Sports and Health Laboratory R, FRANCE
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Movement Sports and Health Laboratory
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Mohamed Ali Hammami, PhD
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Mohamed Ali Hammami, PhD Abderrouf BEN ABDERRAHMANE, PhD GRETCHEN A. CASAZZA, PhD Ammar NEBIGH, PhD Omar BEN OUNIS, PhD Zouhair TABKA, PhD Hassane Zouhal, PhD, HDR
Order of Authors Secondary Information:	
Abstract:	<p>Purpose: We evaluated the effect of two soccer-training seasons on the growth, development and somatotype hormone concentrations of elite youth soccer players.</p> <p>Methods: 20 Elite soccer players (age 14.5 ± 0.4 years) training 8 to 10 hours per week and 20 age-matched non-athletic control subjects (age 14.3 ± 0.3 years) participated in the study. Anthropometric measurements, aerobic (Yo-Yo Intermittent Recovery test level 1) and anaerobic soccer relevant performance tests (squat-jump, countermovement-jump, five jump test, and 30m sprints) and serum concentrations of insulin-like growth factor-1 (IGF-1), insulin-like growth factor binding protein-3 (IGFBP-3), and growth hormone (GH) were assessed 5 times across two competitive seasons.</p> <p>Results: Soccer players were taller, heavier and had lower body fat % than the controls for all time points. Height and weight increased over time in both groups, but % body fat only changed (decreased) in the soccer players. Both groups increased their jump and endurance performance and decreased their sprint times over the 2 year period, but the changes were greater in the soccer players. Soccer players had higher GH, IGF-1 and IGFBP-3 than controls at all time points and had significant increases in these hormones over the 2 year period. Only IGFBP-3 changed (increased) in the control group. Significant correlations over the 2 year time period were only observed in the soccer players between hormonal concentrations (IGF-1 and IGFBP-3) and the jumping tests ($r=0.45-0.48$; $p<0.01$).</p> <p>Conclusion: Somatotrophic axis hormones, and anthropometric and physical parameters increased to a greater degree with growth and soccer training combined compared to growth alone. Our results suggest that intense</p>

Powered by Editorial Manager® and Preprint Manager® from Aries Systems Corporation

Abstract

Purpose: We evaluated the effect of two soccer-training seasons on growth, development and somatotype hormone concentrations of elite youth soccer players. **Methods:** Two groups of young boys participated in this study: 1) 20 Elite soccer players (age 14.5 ± 0.4 years) training 8 to 10 hours per week and 2) 20 age-matched non-athletic control subjects (age 14.3 ± 0.3 years). Anthropometric measurements, aerobic (Yo-Yo Intermittent Recovery test level 1) and anaerobic soccer relevant performance tests (squat-jump, countermovement-jump, five jump test, and 30m sprints) and serum concentrations of insulin-like growth factor-1 (IGF-1), insulin-like growth factor binding protein-3 (IGFBP-3), and growth hormone (GH) were assessed 5 times across two competitive seasons. **Results:** Soccer players were taller, heavier and had lower body fat % than the controls for all time points. Height and weight increased over time in both groups, but % body fat only changed (decreased) in the soccer players. Both groups increased their jump and endurance performance and decreased their sprint times over the 2 year period, but the changes were greater in the soccer players. Soccer players had higher GH, IGF-1 and IGFBP-3 than controls and had significant increases in these hormones over the 2 year period. Only IGFBP-3 changed in the control group. Significant correlations over the 2 year time period were only observed in the soccer players between hormonal concentrations (IGF-1 and IGFBP-3) and the jumping tests ($p < 0.01$). **Conclusion:** Soccer training increased somatotrophic axis hormones, anthropometric and physical parameters to a greater degree than growth alone. Our results suggest that intense exercise training did not impair growth and development or performance in these young soccer players.

Keywords: Exercise training, Morphological development, insulin-like growth factor-1, insulin-like growth factor binding protein-3, growth hormone

Introduction

Physical activity plays an important role in the bone health (Mackelvie et al. 2002) and overall growth and development of children (Roemmich et al. 2001), but the mechanisms for how intense exercise training may affect tissue anabolism separately from normal growth are not completely understood. The effectiveness of exercise training on performance and physical adaptation depends on the training load and on the individual's ability to adapt to training. Too little or too much training will have an impact on the desired physical, mental and performance outcomes. Therefore, finding objective measures to quantify the balance between training load and the athlete's tolerance are essential (Nemet and Eliakim 2010). Intensive sports training and competition are often associated with endocrine deficiencies in adult men (Tanskanen et al. 2011). In young athletes, the stress of intense physical training, combined with calorie restriction, can alter cellular homeostasis and the normal pattern of pubertal development (Adiyaman et al. 2004, Roemmich et al. 2001). The long term harm or benefit from intense training in adolescents is not well known (Roemmich et al. 2001). One of the most studied sports with respect to the effects of intense training on growth and development is gymnastics (Adiyaman et al. 2004, Bricout, 2009). It has been shown that heavy training in these young athletes, combined with restricted caloric intake, has been associated with smaller stature compared to other sport disciplines (Leone et al. 1998). The impact of strenuous exercise on the pubertal development of child and adolescent athletes in other sports is still not well understood.

Normal growth in children and adolescents is regulated to a great extent through the actions of the growth hormone/insulin-like growth factor-I (GH/IGF-I) axis (Adiyaman et al. 2004). Physical exercise plays an important role in the regulation of the GH/IGF-I axis by increasing GH secretion (Kanaley et al. 1997, Kraemer and Ratamess 2005). Data in the literature concerning the effect of training on the GH response to exercise training are mixed. Weltman et al. demonstrated a blunted GH response to acute exercise after 3 and 6 weeks of hard training, in adult men (Weltman et al. 1997). However, in early middle-aged men and young competitive cyclists, Zaccaria et al. did not find a blunted GH response after 4 months of intense endurance training (Zaccaria et al. 1999). Deuschle et al. observed that intense endurance training in elderly male marathon runners, compared to sedentary controls, did not prevent age-associated decline in GH, IGF-1 and insulin-like growth factor binding protein-3 (IGFBP-3) (Deuschle et al. 1998). Moreover, untrained women showed no change in resting

GH pulse amplitude when training below the lactate threshold (Weltman et al. 1992). Conversely, when these women trained above the lactate threshold, their resting GH pulse amplitudes increased. In over-trained athletes, endogenous GH production is suppressed, exercise tolerance is reduced and performance is decreased (Schmikli et al. 2012). Therefore, the GH response to exercise is complex and appears to be affected by many variables such as exercise type, intensity and duration as well as by age.

The effects of exercise training on IGF-1 remain incompletely understood. Some investigations have found that endurance training increased circulating levels of IGF-1 (Maimoun et al. 2004), whereas other authors have reported a decrease (Eliakim et al. 1998). Moreover, acute exercise and exercise training have been reported to increase IGFBP-3 (Di Luigi et al. 2001). Divergent results concerning GH, IGF-1 and IGFBP-3 may be explained by differences in exercise type, intensity and duration as well as the subject's training level, dietary status, body composition, and age.

Soccer is the most popular sport discipline in the world, especially among children and adolescents (Cacciari et al. 1990,). Optimizing the physical potential of young soccer players is one of the main objectives of youth soccer academies. Indeed, elite soccer players must be prepared to perform and sustain the high loads of training observed at the elite level. The most important variables for measuring performance in soccer are physical fitness and technical and tactical performance (Rösch et al 2000). The physical fitness of soccer players is usually measured in terms of endurance, speed, power, and strength (Hoff, 2005). It is relatively easy to test the physical fitness of young players, but it is a more challenging task to differentiate between the adaptations of soccer training and growth-mediated development (Vänttinen et al. 2011).

Some cross-sectional studies have demonstrated that soccer practice induces positive hormonal adaptations (Hansen et al.1999; Mejri et al. 2005, Vanttinen et al. 2011). However, effects of long-term intense soccer training on the adaptations of GH/IGF-I axis are very scarce. To the best of our knowledge, only one study examined the effects of intense soccer training over a competitive season on hormones related to growth. Mejri et al. observed, in young adult soccer players (19 years of age), that soccer training decreased exercise-stimulated GH levels throughout the competitive season, but did not have any effect on basal IGF-1 and IGFBP-3 levels (Mejri et al. 2005). However, this study had subjects at the end of

adolescent growth and they did not include a control group to differentiate exercise training from normal growth (Bouix et al. 1997).

To the best of our knowledge no longitudinal investigation (more than 1-yr.) has studied the impact of intense exercise training in elite adolescent soccer players on markers of growth and development. Therefore, the purpose of this study was to compare changes in growth related hormones (GH, IGF-1 and IGFBP-3) between elite youth soccer players belonging to the Tunisian U17 national team and non-athletic controls over a 2 year period. We hypothesized that soccer-training would elicit greater physical, hormonal and physiological changes than just growth alone.

METHODS

Subjects

Forty adolescent boys were recruited to participate to our study. Twenty were residents at the youth academy of elite soccer players (Borj Cedria, Tunisia) (age: 14.5 ± 0.4 years at the start of the study) and were members of the U-17 national team of Tunisia. These athletes were preparing for the U-17 Championship of African Nations which is a qualifier for the world cup. This group of elite players was selected from among 800 young male soccer players from six regional centres of football throughout Tunisia. The criteria used for selection was based on technical tests and physical fitness parameters. They had been playing soccer, in addition to their school physical education, for 11 months of the year, for at least 5 years, at a rate of 5 practice sessions and one competitive game per week. In general, soccer training sessions lasted ~1.5 hours, with about 15-20 min of warm up consisting of low-intensity games and stretching exercises, 15-25 min of technical soccer exercises (kicking, dribbling, jumping, and running with fast accelerations and decelerations), 20-30 min of match practice, and 10-15 min of active recovery.

The other twenty subjects (age: 14.3 ± 0.3 years at the beginning of the study) were assigned to the control group (non-athletic boys). They participated only in the compulsory physical education curriculum at school (two weekly sessions of 50 min). Control group were randomly chosen at the neighbouring colleges' national centre for preparation of Tunisian young elite soccer players, were healthy and were representative of the general population. Written informed consent was obtained from the parents of each subject before the study, and

the study was approved by the Ethical Committee on Human Research of the University of Manouba, Tunisia.

Experimental Design

The experiment was conducted in five time-points for both soccer players and control groups (figure 1).

The measurements were conducted over 2 days. On both testing days, all subjects performed the identical standardized 15 min warm-up consisting of low-intensity running, a series of dynamic stretching exercises (high knee lifts, butt kicks, straight line skipping, etc.) and short accelerations. On the first test day, subjects performed a squat jump, counter movement jump, a 5 consecutive jump test and a 30m sprint. On the second testing day, the subjects performed a Yo-Yo Intermittent Recovery Test - Level 1 (Bangsbo et al. 1994)

Puberty Stage Assessment

Puberty (Tanner) stage was determined and recorded by a paediatrician experienced in the assessment of secondary sex characteristics according to the method of Tanner (Tanner, 1975). It was determined that all subjects were at Tanner stage 2-3 in the beginning of the study and after 2 years they were attained at tanner stage 4 to 5.

Anthropometric Characteristics

Each participant came to the laboratory for a medical examination and anthropometric measurements performed by a paediatrician at each time period (T0, T1, T2, T3 and T4). Body height and body mass were measured with standard techniques to the nearest 0.1 cm and 0.1 kg, respectively for each subject. To estimate the adiposity, skin-fold thickness was measured at four sites on the left-side of the body (triceps, biceps, subscapular and suprailiac) using a Harpenden skin-fold calliper (British Indicators Ltd., Luton) for calculation of percentage of body fat (Durning et al. 1985). All measurements were taken in the morning at 07:30am by the same investigator for all time periods.

Physical Fitness Characteristics

Vertical Jump: Each subject performed three maximal jumps, a squat-jump (SqJ), starting with knees bent at 90° and without previous counter movement; a counter-movement-jump (CMJ), starting from a standing position allowing for counter movement with the intention of reaching knee bending angles of around 90° just before propulsion; and a five-jump-test (5J), consisting of 5 jumps interspersed with 1-minute rest period between jumps. The ground reaction force generated during these vertical jumps was measured with an ergo jump (Opto Jump Microgate - ITALY) and converted to cm. Each player performed 3 SJ, 3 CMJ and 3 5J interspersed with 1-min rest in-between, and the best (highest) jump of each type was used for analysis

Running speed test: The participants performed three maximal 30-m sprints, measured with an infrared photoelectric cell (Cell Kit Speed Brower, USA). During the 3-minute recovery periods in-between sprints, the participants walked-back to the starting line and then waited for the next sprint. The participants commenced the sprint from a standing start, 0.5 m behind the first timing gate. Stance for the start was consistent for all participants. The best (fastest) 30-m sprint time was selected for analysis. The results show that these tests were highly repeatable: 30-m sprint (intra-class correlation) (ICC = 0.96), SJ (ICC = 0.93), CMJ (ICC = 0.90), 5-J (ICC = 0.89).

Endurance Performance: The Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 1 (YYIRT1) was used to estimate maximal oxygen consumption (VO_{2max}) (Bangsbo et al. 1994). Briefly, the YYIRT1 consisted of repeated 20m runs back and forth between the starting, turning, and finishing line at a progressively increased speed controlled by an audio metronome from a calibrated CD player. The subjects had a 10-s active rest period (decelerating and walking back to the starting line) between each running bout. When the subjects failed twice to reach the finishing line in time, or decided that they could no longer run at the imposed pace, the total distance covered was recorded. VO_{2max} was estimated from the equation: VO_{2max} (ml/kg/min) = YYIRT1 distance completed (m) * 0.0084 + 36.4. All tests were conducted by the same investigators, scheduled at the same time of day, carried out in the same order and using the same apparatus at each period. All jumping tests were performed on a concrete surface with the players wearing running shoes, whereas the running speed test and the Yo-Yo IRT Level 1 tests were performed on a football pitch with the players wearing football boots. Each player was instructed and verbally encouraged to provide maximal effort during all tests.

Blood analysis

Blood samples were drawn from all participants at each of the five testing periods, during the same week as the physical tests and anthropometric measurements. Blood samples were taken between 7:00 and 8:30 am following an overnight fast. The blood samples were centrifuged for 10 minutes at 4°C and 3000 rpm and the extracted serum was stored frozen at -80°C until analysis. Growth hormone (GH) was measured by a sensitive chemiluminescent assay (Immulite, Diagnostic Products Corp., Los Angeles, CA, USA). Inter-assay coefficient of variation (CV) was 5.7-10% and the intra-assay CV was 4.9-8.3%.

Assay sensitivity was 0.1 ng/ml. Serum concentrations of total insulin-like growth factor-1 (IGF-1) were measured using the Non-Extraction Insulin-Like Growth Factor-1 IRMA Kit (Diagnostic Systems Laboratories, Webster, TX, USA). The sensitivity, or minimum detection limit, was 2 ng/ml. The inter-assay coefficients of variability (CVs) were 7.4 and 4.2%, respectively, for concentrations 35.5 and 383.9 ng/ml. The inter-assay CVs were 7 and 3.9%, respectively, for the mean concentrations 34.0 and 373.9 ng/ml. Serum concentrations of total insulin-like growth factor binding protein-3 (IGFBP-3) were estimated using the Non-Extraction Insulin-Like Growth Factor Binding Protein-3 (IGFBP-3) Immunoradiometric Assay Kit (Diagnostic Systems Laboratories, Webster, TX, USA). The minimum detection limit was approximately 0.5 ng/ml. The intra-assay CVs were 1.8 and 3.9%, respectively, for the mean concentrations 82.7 and 7.4 ng/ml. The inter-assay CVs were 1.9 and 0.6%, respectively, for the mean concentrations 76.9 and 8.0 ng/ml.

Statistical Analysis

Results are expressed as means \pm standard deviations (SD). An analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was used to check significant differences between groups and across time points in anthropometric and physical parameters and hormonal concentrations (SPSS for Windows, version 16.0; SPSS Inc, Chicago). Significant differences were assumed when $p < 0.05$. All variables used in the study were checked for normality of distribution before the analyses (Kolmogorov-Smirnov tests). Correlations between GH, IGF-1, IGFBP-3 and physical fitness parameters were determined by simple regression. The reliability of each test was assessed by intra-class correlations (ICCs).

Results

The anthropometric data of the soccer players and control group are summarized in **Table 1**. Significant differences were observed in all weight, height and % of body fat measurements between soccer players and the controls ($p < 0.01$).

Table 2 shows changes in anthropometric parameters (weight, height and % body fat) for soccer players and the control group throughout the various time periods T0-T1 (first follow-up period): T1-T2 (second follow-up period): T2-T3 (third follow-up period): T3-T4 (fourth follow-up period): T0-T4 (Total follow-up period). For soccer players, the change values (Δ) were statistically significant for height and weight ($p < 0.01$). However, for % body fat, significant differences were only observed in total period T0-T4. For control subjects, significant Δ differences were observed for most of the follow-up periods for height and weight, but there was no significant change in % body fat in any time period.

The results for the physical fitness testing parameters (CMJ, SqJ, 5J, 30m Sprint, YYIRT (m) and estimated VO_{2max}) in soccer players compared with the control group during each time period are presented in **Table 3**. The results demonstrate that most of the Δ differences were significantly greater for young soccer players compared with controls. Over the Total period (T0-T4) we observed significantly greater changes (Δ) in the soccer players than the controls for all parameters (**Table 3**).

Table 4 shows that the hormonal concentrations of GH, IGF-1 and IGFBP-3 of the soccer players were significantly higher than those of the control subjects at all the assessment periods ($p < 0.001$). **FIGURE 2** shows the change in GH in young soccer players and the control group. Significant GH increases were observed in soccer players (A) during all the time periods ($p < 0.01$). However, no significant changes were recorded for the control group (B). **FIGURE 3** illustrates the change in IGF-1 for soccer players and the control subjects. Significant changes were observed from baseline for the soccer players during all time periods (T0-T1, T0-T2, T0-T3) ($p < 0.01$) (A). Similarly, significant differences were observed across all periods for the soccer players (T1-T2; T2-T3; T3-T4 and T0-T4) ($p < 0.01$) (A). For control subjects, we only saw significant differences in IGF-I at T0-T1 and for the total time period (T0-T4) ($p < 0.05$) (B). The change in IGFBP-3 in young soccer players and controls was represented in **FIGURE 4**. During the different time periods, significant changes are observed in young soccer players for T0-T1, T0-T2 and T0-T3 ($p < 0.01$) (A). In

addition, statistically significant differences ($p < 0.01$) were distinguished in all periods (T1-T2, T2-T3, T3-T4 and T0-T4) (A). For the control group we observed significant differences ($p < 0.01$) in IGFBP-3 only at T0-T1 and following the final phase of the longitudinal study (T0-T4), (B).

Table 5 shows that IGF-1 was significantly correlated with the CMJ ($r = 0.49$, $p < 0.05$), SqJ ($r = 0.58$, $p < 0.01$) and 5J ($r = 0.52$, $p < 0.01$) for soccer players at T0. In addition, at T4 the same correlations are observed between IGF-1 and the same physical parameters (CMJ, SqJ and 5J). Regression analysis showed significant correlations between IGFBP-3 with CMJ ($r = 0.45$, $p < 0.05$), SqJ ($r = 0.58$, $p < 0.01$) and 5J ($r = 0.47$, $p < 0.01$) for soccer players at T0. Similar correlations are recorded between IGFBP-3 and the same physical parameters (CMJ, SqJ and 5J) for young soccer players compared to control subjects at T4. Thus, no significant relationship was observed between IGFBP-3 and these physical parameters for the control group at T0 and T4. However, no significant correlations were found between GH and physical performances for either group at any time point.

Discussion

The soccer players started the study taller and heavier than the control subjects, but they were well matched for age and Tanner stage of pubertal development. As expected we saw a significant increase in height in all of our adolescent subjects over the 2 year period. The elite soccer players remained taller compared to the control group at all time points. Our results support the idea that sport, even intense soccer training, has beneficial effects on growth (Mackelvie et al. 2002) and have the same opinion with other studies that reported that youth elite soccer players were taller (Gil et al. 2007) and skeletally more mature (Malina et al. 2000) compared to the control subjects.

In our study, a substantial difference was also observed in weight between the young players and control subjects all over the two soccer seasons at all five time-points. The soccer players were heavier at all time points compared to controls, which confirms the findings of Gil et al that elite soccer players are heavier than their non-elite counterparts (Gil et al. 2007). In the elite soccer players, weight decreased significantly from T0 to T3, and increased slightly T4, while for controls, a significant increase of weight was observed from T0 to T4.

Significant differences in percentage of body fat were observed between the two groups throughout the study period. The soccer players were leaner than the controls throughout the study period. Similar results were observed by other authors comparing elite soccer players to non-elite players (Gil et al. 2007, Gravina et al. 2008). For youth soccer players, the body fat decreased significantly over the study period (T0-T4) ($p < 0.01$), but for control subjects no significant changes were observed.

Hormonal Concentrations between each point-time during two soccer seasons

Physical exercise is the one factor for others, which have an important role and participate in the regulation of the GH-IGF-I axis (Kanaley et al. 1997). The GH response to exercise is dependent on the duration and intensity of the exercise, the fitness of the exercising subject, and other environmental factors such as the ambient temperature (Holt et al. 2001, Wheldon et al. 2006). During teenage years, Growth hormone plays an essential role in the regulation of anthropometric characteristics has a key role in regulating body composition. Thus, in physical training this hormone can modify hormonal responses to physical activity and adapts endocrinal functions to repeated muscular exercise, especially somatotype hormones responses (Duclos, 2001). Our results showed significant changes in plasma GH concentrations during the different time periods and after two-soccer seasons in young soccer players but no change was seen in the control group. Indeed Eliakim & Nemet showed that longer periods of training were associated with stable or with increases in circulating GH and IGF-1 levels (Eliakim & Nemet 2010).

However, our results are not consistent with those reported by the only study, to our knowledge, which monitored plasma GH concentrations during one soccer season (Mejri et al. 2005). Previous studies demonstrated that GH levels at rest and in response to exercise were considerably greater at the beginning of the soccer season (S1) than in its middle (S2) or at its end (S3) (Mejri et al. 2005). These differences of findings can generally be explained by different factors known to affect GH responses at rest, such as level of intensity and duration of training session and chronological age for the body (Kraemer and Ratamess, 2005). That's way, soccer players involved in the study conducted by Mejri et al. were young adults (19 ± 1 yr.) and their relative training load was lower than that of our soccer players. It was suggested that a threshold training intensity was required to stimulate a changes in GH with a long-period training (Manetta et al. 2002). Also, the study by Mejri et al. had no control group, so it is difficult to separate changes in growth versus changes due to training.

Contradictory results have been reported regarding the sensitive effect of physical exercise on serum IGF-I (Eliakim et al. 1998; Walker et al. 2004). Data from the present study illustrate a modification in serum total IGF-I for soccer players and the control subjects. Thus, acute increases in serum total IGF-I were identified following different periods for soccer players (T0-T1, T0-T2, T0-T3) ($p < 0.01$). As well, there were significant differences across all periods in soccer players compared to control subjects after two soccer seasons ($p < 0.01$). For this reason, the serum IGF-1 levels increased steadily just about pre-puberty, with a peak going on late puberty, and declining quickly thereafter (Juul et al. 1995). Accordingly, this hormone considered as polypeptide, which present in the systemic circulation was synthesized by adolescents throughout puberty (Mackelvie et al. 2002). In the present study, for control subjects, we detect only significant differences in the first training block (T0-T1) and over the total study period (T0-T4) ($p < 0.01$). The differences observed between soccer players and control subjects are not surprising, as it was reported that long-term training is accompanied by an increase in resting IGF-1 values (Kraemer and Ratamess, 2005). However, the effects of regular physical exercise on IGF-1 continue incompletely understood. Several studies have found that endurance training resulted in increasing circulating levels of IGF-1 in young men and women (Kanaley et al 1997, Holt et al 2001), at the same time as the others have reported a differing effect (Eliakim et al. 1998). Poelman et al. found that endurance training increased the fasting level of IGF-1 in older adults (Poelman et al. 1994). These results recommended that age associated with a decline in somatotrophic axis may be attenuated by endurance training.

As for GH results, our finding concerning IGF-I basal values are not in accord with those reported by Mejri et al. (2005) and the same clarifications can be advanced here to elucidate these differences of opinion. In young people, high-intensity exercise is allied with increased activity of the IGF system favoring an anabolic state (Eliakim et al. 1998). The serum of IGFBP3 is the major binding protein for IGF-1 in human circulation. This hormone represented as glycoprotein which is synthesized in many tissues; it is not only a transport protein but has also other complex actions: it modulates both the endocrine and paracrine actions of IGF-1, influences its bioavailability and may also exert IGF-independent effects on target cells. IGFBP3 level increased throughout our study. This protein is modified in plasma and varied during the soccer season. IGFBP3 could be a way for GH (which changes rapidly with physical exercise) to prolong its effects (Bouix et al 1997; Juul et al 1995).

Throughout the different stages in this study, significant changes were observed in young soccer players compared to controls subjects after two soccer seasons. IGFBP-3 levels were higher in the young soccer players compared with the control group. The significant improvement of serum IGFBP-3 is in agreement with the other data examining IGFBP-3 in children and adolescents (Juul et al 1999). Thus, the average concentrations of IGFBP-3 increase progressively during puberty to reach the maximal values about the age of 14-15 (Bouix et al.1997). Moreover, exercise and training have been reported to increase IGFBP-3 (Di Luigi et al. 2001) and there is general agreement about this finding.

Physical fitness parameters and hormonal concentrations

Previous findings demonstrated that levels of physical fitness in adults or young men are known to be correlated with concentration levels of IGF-1. Serum IGF-1 and serum IGFBP3 levels are identified to positively correlate with normal growth rate in children and adolescents and also with aerobic performance in children (Brun et al. 1996; Manetta et al. 2002).

Significant correlations between IGF-1 and fitness parameters (CMJ, SqJ and 5J) have been found in our young soccer players in the beginning of the study and after two soccer seasons. The correlation existing between fitness parameters and serum IGF-I, confirm that in healthy adolescents, high-intensity exercise is associated with increased activity of the IGF system favoring an anabolic state (Eliakim et al. 1998). Therefore, Maimoun et al. observed that the bioavailability IGF-1 index (IGF-1/IGFBP-3) increased thorough the season, while IGFBP3 concentrations were unchanged after a triathlon season (Maimoun et al. 2004).

Similar to serum IGF-1 levels, the levels of serum IGFBP-3 are also positively correlated with fitness parameters (CMJ, SqJ and 5J) in young players following two soccer seasons but not in control subjects. Similarly, significant correlation between serum IGFBP3 and physical parameter (VO2max) has been described in young male subjects (Brun et al. 1996). Thus, IGFBP3 may be considered as an endocrine marker of physical fitness (Manetta et al. 2002).

Data in the literature concerning the effect of training on GH levels are controversial. However, in our study, no association was observed between GH and physical performances in young soccer players and control subjects in all point measurements throughout two soccer

seasons. In contrast, Eliakim et al. found a positive correlation between fitness and overnight GH levels in adolescent females. Training increased not only the resting GH levels but also its response to exercise (Manetta al. 2002). Thus, the GH response to training may be different depending on the age of the subjects, on the level intensity of training and the physical activity practiced (Kraemer et Ratamess, 2005).

Conclusion

To the best of our knowledge, this study is the first to monitor somatotype hormones and training load effects during long-term soccer training (two season follow-up) in elite adolescent soccer players. This study provides results concerning anthropometric characteristics, physical fitness performances and hormonal concentrations for highly trained young soccer players. Based on these data, soccer participation by young elite players increased GH concentrations compared to control subjects and this may represent an adaptation to exercise with soccer training. Total IGF-1 levels and IGFBP3 remained strongly correlated with fitness performances (CMJ, SqJ, 5J). Serum IGF-1 and serum IGFBP3 levels may be considered as endocrine markers of physical fitness in young soccer players.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the soccer players and control boys who participated in this study. We also thank the Tunisian Football Federation for its unfailing collaboration. The results of the present study do not constitute endorsement by ACSM

References

1. Adiyaman P, Ocal G, Berberoğlu M, Evliyaoğlu O, Aycan Z, Cetinkaya E, Bulca Y, Ersöz G, Akar N. Alterations in serum growth hormone (GH)/GH dependent ternary complex components (IGF-I, IGFBP-3, ALS, IGF-I/IGFBP-3 molar ratio) and the influence of these alterations on growth pattern in female rhythmic gymnasts. *J Pediatr Endocrinol Metab.* 2004; 17(6):895-903.
2. Bangsbo J. The physiology of soccer--with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiol Scand Suppl.* 1994; 619: 1-155.
3. Bouix O, Brun JF, Fedou C, et al. Exploration de gymnastes adolescents de classe sportive : quel suivi médical pour la croissance et la puberté ? *Sciences et sport*, 1997 ; 1:51-65.
4. Bricout VA. Effets de la gymnastique sportive sur la croissance et la maturation pubertaire des jeunes filles. *Science et sports*, 2003 ; 18 : 65-73.
5. Brink MS, Nederhof E, Visscher C, Schmikli SL, Lemmink KA. Monitoring load, recovery, and performance in young elite soccer players. *J Strength Cond Res.* 2010 ; 24(3):597-603.
6. Brun JF, Blachon C, Micallef JP. Proteines porteuses des somatomedines et force isometrique de prehension dans un groupe de gymnastes adolescents soumis a` un entraînement intensif. *Science et Sports.* 1996; 11:157–165.
7. Deuschle M, Blum WF, Frystyk J, Orskov H, Schweiger U, Weber B, Körner A, Gotthardt U, Schmider J, Standhardt H, Heuser I. Endurance training and its effect upon the activity of the GH-IGFs system in the elderly. *Int J Sports Med.* 1998;19(4):250-4.
8. Di Luigi L, Guidetti L, Nordio M, Baldari C, Romanelli F. Acute effect of physical exercise on serum insulin-like Growth Factor-Binding protein 2 and 3 in healthy men: role of exercise linked Growth Hormone Secretion. *Int J Sports Med.* 2001; 22(2):103–110.
9. Duclos, M. Effets de l'entraînement physique sur les fonctions endocrines. *Annal Endocrinol.* 2001; 62:19–32.
10. Eliakim A, Brassel JA, Mohan S, Wong WLT, Cooper DM. Increased physical activity and the growth hormone-IGF-1 axis in adolescent males. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 1998;275:R308–R314.

11. Eliakim A, Nemet D, Jürimäe J, Hills AP, Jürimäe T (eds): Cytokines, Growth Mediators and Physical Activity in Children during Puberty. Med Sport Sci. Basel, Karger, 2010, vol 55, pp 128–140.
12. Gil S, Ruiz F, Irazusta, A, Gil J, Irazusta, J. Selection of young soccer players in terms of anthropometric and physiological factors. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 2007; 47:25-32.
13. Gravina, L, Gil, S, Ruiz, F, Zubero, J, Gil, J, and Irazusta, J. Anthropometric and physiological differences between first team and reserve soccer players aged 10–14 years at the beginning and end of the season. J Strength Cond Res 22: 1308–1314, 2008.
14. Hansen L, Bangsbo J, T wisk, and K. Klausen. Development of muscle strength in relation to training level and testosterone in young male soccer players. J Appl Physiol. 1999; 87:1141-1147
15. Hoff, J. Training and testing physical capacities for elite soccer players. J Sports Sci 2005; 23:573–582.
16. Holt RI, Webb E, Pentecost C, Sonksen PH. Aging and physical fitness are more important than obesity in determining exercise-induced generation of GH. J Clin Endocrinol Metab. 2001; 86:5715–5720.
17. Juul A, Dalgaard P, Werner F. Serum levels of insulin-like growth factor (IGF)-binding protein-3 (IGFBP-3) in healthy infants, children and adolescents: the relation to IGF-I, IGF-II, IGFBP-1, IGFBP-2, age, sex, body mass index, and pubertal maturation. J Clin Endocrinol Metab 1995; 80: 2534-42.
18. Kanaley JA, Weltman JY, Veldhuis JD, Rogol AD, Hartman ML, Weltman A. Human growth hormone response to repeated bouts of aerobic exercise. J Appl Physiol. 1997; 83:1756–1761.
19. Kraemer WJ, Ratamess NA. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. Sports Med. 2005 ; 35:339-61.
20. Leone M, Larivière G. Caractéristiques anthropométriques et biomotrices d'adolescents athlètes élités de disciplines sportives différentes. Science et sports, 1998 ; 13 :26-33.
21. Mackelvie KJ, Khan KM, McKay HA. Is there a critical period for bone response to weight-bearing exercise in children and adolescents? A systematic review. Br J Sports Med. 2002; 36:250-7.

22. Maimoun L, Galy O, Manetta J. Competitive season of triathlon does not alter bone metabolism and bone mineral status in male triathletes. *Int J Sports Med.* 2004; 25(3):230–234.
23. Malina R.M, Peña Reyes M.E, Eisenmann JC, Horta L, Rodrigues J, Miller, R. Height, mass and skeletal maturity of elite Portuguese soccer players aged 11-16 years. *Journal of Sports Sciences.* 2000. 18: 685-93.
24. Manetta J, Brun JF, Maimoun L, Callis A, Prefaut C, Mercier J. Effect of training on the GH/IGF-1 axis during exercise in middle-aged men: relationship to glucose homeostasis. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2002; 283(5):E929–E936.
25. Mejri S, Bechir F, Ben Rayana MC, Ben Hamida J, Ben Slama C. Effect of training on GH and IGF-1 responses to a submaximal exercise in football players. *Eur J Appl Physiol.* 2005 ; 95: 496–503.
26. Mejri S, Bchir F, Koubaa D, Ben Slama C. Reponses de GH, IGF-1 et IGFBP3 a` un exercice submaximal: differences entre sujets entraines et sedentaires. *Sci Sports.* 2004 ; 19:80–85.
27. Nemet D, Eliakim A. Growth hormone-insulin-like growth factor-1 and inflammatory response to a single exercise bout in children and adolescents. *Med Sport Sci.* 2010; 55:141-55.
28. Poelman ET, Rosen CJ, Copeland KC .Influence of endurance training on insulin-like growth factor-1 in older individuals. *Metabolism.* 1994; 43:1401–1405.
29. Roemmich JN, Richmond RJ, Rogol AD. Consequences of sport training during puberty. *J Endocrinol Invest.* 2001; 24(9):708-15.
30. Rösch, D, Hodgson, R, Peterson, L, Graf-Baumann, T, Junge, A, Chomiak, J, and Dvorak, J. Assessment and evaluation of football performance. *Am J Sports Med.* 2000;28: 29–39.
31. Schmikli SL, de Vries WR, Brink MS, Backx FJ. Monitoring performance, pituitary-adrenal hormones and mood profiles: how to diagnose non-functional over-reaching in male elite junior soccer players. *Br J Sports Med.* 2012;46(14):1019-23.
32. Steinacker JM, Lormes W, Reissnecker S, Liu Y (2004) New aspects of the hormone and cytokine response to training. *Eur J Appl Physiol* 91(4):382–391.
33. Tanskanen MM, Kyröläinen H, Uusitalo AL, Huovinen J, Nissilä J, Kinnunen H, Atalay M, Häkkinen K. Serum sex hormone-binding globulin and cortisol

- concentrations are associated with overreaching during strenuous military training. *J Strength Cond Res.* 2011; 25(3):787-97.
34. Tanner, J.M. Growth endocrinology of the adolescence. In: Gardner L, editor. *Endocrine Genetic Diseases of childhood and Adolescence.*1975; Philadelphia: WB Saunders p. 14 - 64.
35. Vääntinen, T, Blomqvist, M, Nyman, K, and Häkkinen, K. Changes in body composition, hormonal status, and physical fitness in 11-, 13-, and 15-year-old Finnish regional youth soccer players during a two-year follow-up.*J Strength Cond Res.* 2011; 25:3342-51.
36. Weltman A, Weltman JY, Schurrer R, Evans WS, Veldhuis JD, Rogol AD. Endurance training amplifies the pulsatile release of growth hormone: effects of training intensity. *J Appl physiol* 1992; 72:2188–2196.
37. Weltman A, Weltman JY, Womack CJ, Davis SE, Blumer JL, Gaesser GA, Hartman ML Exercise training decreases the growth hormone (GH) response to acute constant-load exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 1997; 29(5):669-76.
38. Wheldon A, Savine RL, Sonksen PH, Holt RI. Exercising in the cold inhibits growth hormone secretion by reducing the rise in core body temperature. *Growth Horm IGF Res.* 2006; 16:125–131.
39. Zaccaria M, Varnier M, Piazza P, Noventa D, Ermolao A. Blunted growth hormone response to maximal exercise in middle-aged versus young subjects and no effect of endurance training. *J Clin Endocrinol Metab.* 1999; 84(7):2303-7.

TABLE 1.Anthropometric characteristics of soccer players and control subjects determined across two-soccer seasons (mean \pm SD).

Measurements	Soccer players (n = 20)	Controls (n = 20)	P Values	difference between groups
Weight (kg)				
T0	69.0 \pm 5.7	52.7 \pm 12.4	0.001	16.3**
T1	66.6 \pm 5.5	53.4 \pm 12.6	0.001	13.2**
T2	67.9 \pm 5.3	54.55 \pm 12.	0.001	13.3**
T3	68.7 \pm 5.4	56.6 \pm 12.3	0.001	12.1**
T4	70.0 \pm 5.3	57.8 \pm 11.9	0.001	12.1**
Height (cm)				
T0	174.5 \pm 3.5	167.7 \pm 8.8	0.01	6.7*
T1	176.0 \pm 3.4	168.2 \pm 8.9	0.01	7.7*
T2	178.2 \pm 3.1	170.1 \pm 8,9	0.001	8.0**
T3	181.0 \pm 3.4	171.8 \pm 8.8	0.001	9.2**
T4	184.2 \pm 3.8	173.25 \pm 9.	0.001	10.9**
Body fat (%)				
T0	12.8 \pm 3.0	17.9 \pm 2.9	0.01	-5.1*
T1	12.2 \pm 2.9	16.6 \pm 2.6	0.01	-4.4*
T2	11.4 \pm 2.6	16.6 \pm 2.2	0.01	-5.1*
T3	10.8 \pm 1.4	16.7 \pm 2.2	0.001	-5.9**
T4	10.1 \pm 1.0	16.3 \pm 2.4	0.001	-6.2**

Significant differences between soccer players and control subjects, * p < 0.01; ** p < 0.001

TABLE 2.Changes in anthropometric characteristics of soccer players and control subjects across two-soccer seasons (mean \pm SD).

Measurements	Soccer players (n = 20)	Controls (n = 20)
Weight (kg)	Δ	Δ
T0-T1	-2.4*	0.7
T1-T2	1.2*	1.1*
T2-T3	0.8*	2.0*
T3-T4	1.2*	1.2*
T0-T4	0.9*	5.1**
Height (cm)	Δ	Δ
T0-T1	1.4*	0.4*
T1-T2	2.2*	1.8*
T2-T3	2.8**	1.7*
T3-T4	3.2**	1.4*
T0-T4	8.7**	5.4**
%Body fat (%)	Δ	Δ
T0-T1	-0.5	-1.3
T1-T2	-0.7	0.0
T2-T3	-0.5	0.1
T3-T4	-0.7	0.4
T0-T4	-2.6*	1.5

Significant differences between time periods in soccer players and control subjects, * p < 0.01;

** p < 0.001

TABLE 3.Change inPhysical fitness parameters of soccer players and control subjects across two-soccer seasons (mean \pm SD).

Variables	CMJ (cm)		SqJ (cm)		5J (cm)		30m (s)		YYIRT (m)		VO _{2max} (ml/kg/min)	
Groups	SP	C	SP	C	SP	C	SP	C	SP	C	SP	C
T0-T1	3.12 **	0.93£	1.80 **	0.25£	1.31 **	0.44*£	-0.03	-0.02	744 **	18£	5.35 **	0.10£
T1-T2	2.22**	1.57*£	1.40*	0.01£	0.36	0.42	-0.03	-0.01	326*	90£	2.30*	0.03£
T2-T3	5.27 **	0.97£	3.43 **	0.72£	0.57*	0.63*	-0.17*	-0.07£	224**	72£	1.11*	0.62£
T3-T4	2.13 **	1.08£	0.39*	0.48*£	1.21**	0.51£	-0.04	-0.05	262 **	8£	1.87 **	0.61£
T0-T4	12.62 **	3.85***£	7.02 **	1.46 ***£	2.73 **	1.14***£	-0.27**	-0.15***£	1108 **	188***£	8.40 **	1.36 ***£

CMJ, countermovement jump; SqJ, squat jump; 5J, highest of five consecutive jumps with 1-min rest in-between; 30m, 30-m sprint; YYIRT, distance covered in the Yo-Yo Intermittent Recovery Test - Level 1; VO_{2max}, maximal oxygen consumption; **SP**, Soccer player; **C**, Controls; Significant differences in change between time points * $p < 0.01$, ** $p < 0.001$. Significant differences in change between soccer players and control subjects £: $p < 0.01$.

TABLE 4. Hormonal Concentrations (GH, IGF-1 and IGFBP3) of soccer players and control subjects across two-soccer seasons (mean \pm SD).

Measurements	Soccer players (n = 20)	Controls (n = 20)	P Values	difference between groups
GH (nmol/L)				
T0	1.69 \pm 0.44	1.19 \pm 0.90	0.01	0.50*
T1	2.07 \pm 0.48	1.15 \pm 0.62	0.01	0.92*
T2	2.62 \pm 0.41	1.39 \pm 0.67	0.001	1.23**
T3	2.70 \pm 0.43	1.25 \pm 0.55	0.001	1.45**
T4	2.02 \pm 0.47	1.05 \pm 0.58	0.01	0.97*
IGF-1 (nmol/L)				
T0	765.35 \pm 62.71	455.95 \pm 71.29	0.001	309.4**
T1	847.95 \pm 38.02	515.70 \pm 61.56	0.001	332.25**
T2	914.20 \pm 34.68	523.75 \pm 58.87	0.001	390.45**
T3	970.60 \pm 34.45	552.90 \pm 80.91	0.001	417.7**
T4	851.65 \pm 43.97	396.55 \pm 95.78	0.001	455.10**
IGFBP-3 (nmol/L)				
T0	45.75 \pm 5.36	38.11 \pm 3.09	0.001	7.64**
T1	49.35 \pm 4.52	41.70 \pm 2.12	0.001	7.65**
T2	51.30 \pm 3.77	42.15 \pm 3.24	0.001	9.15**
T3	55.70 \pm 5.84	43.45 \pm 4.55	0.001	12.25**
T4	57.55 \pm 5.86	42.00 \pm 5.54	0.001	15.55**

GH, growth hormone; IGF-1, insulin-like growth factor-1, IGFBP3, insulin-like growth factor binding protein-3; Significant differences between soccer players and control subjects

* $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

TABLE 5.Relationship between physical fitness parameters and hormonal concentrations (GH, IGF-1 and IGFBP-3) for the soccer players and control subjects.

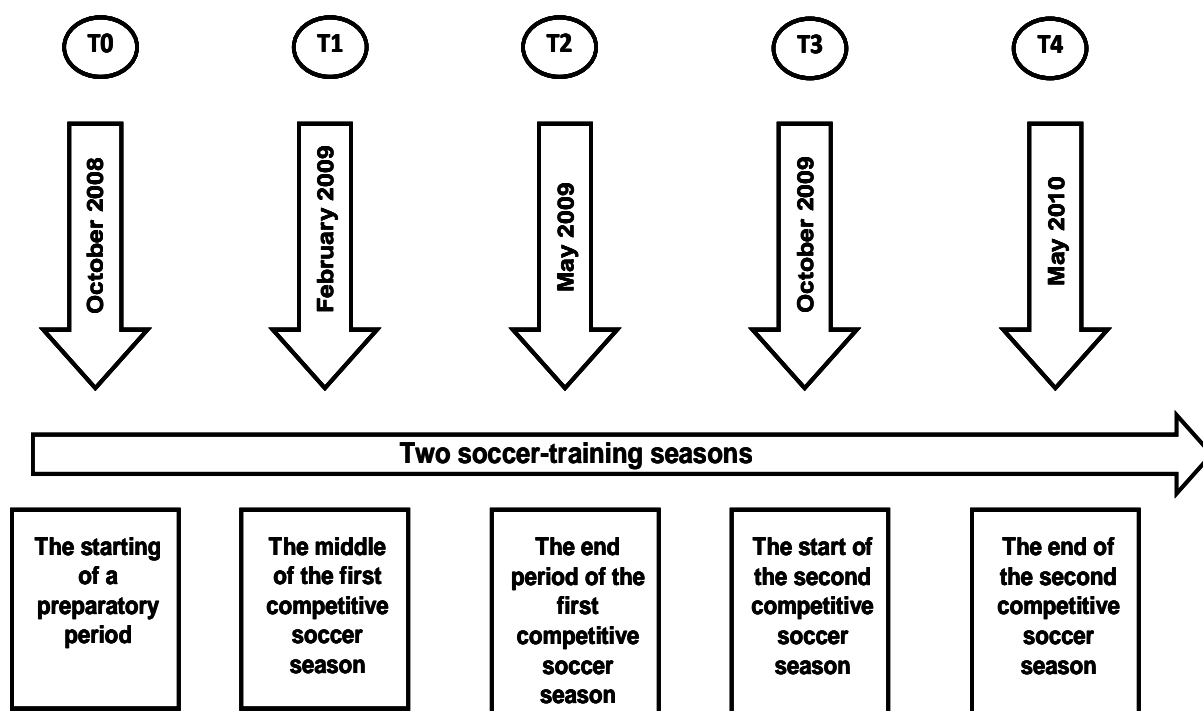
Periods	T0		T4		T0		T4		T 0		T 4	
Groups	S P	C	S P	C	S P	C	S P	C	S P	C	S P	C
Variables	GH (ng/ml)				IGF-1 (ng/ml)				IGFBP-3 (ng/ml)			
	(r)		(r)		(r)		(r)		(r)		(r)	
CMJ (cm)	0.07	-0.12	0.24	-0.11	0.49 *	0.01	0.45 *	0.05	0.45*	0.15	0.47*	0.05
SqJ (cm)	0.04	-0.15	0.13	-0.04	0.58 **	0.13	0.57 **	0.24	0.58**	0.04	0.57**	0.03
5J (cm)	0.25	-0.18	0.27	-0.16	0.52 **	0.04	0.47 *	0.05	0.47*	0.27	0.52**	0.11
30m (s)	-0.02	-0.11	-0.11	-0.16	0.02	0.11	0.14	0.19	0.17	0.09	0.21	0.14
YYIRT (m)	-0.36	-0.10	-0.20	-0.16	0.22	0.04	0.19	0.14	0.36	0.16	0.13	0.12
VO2 max (ml/min/kg)	-0.05	-0.02	-0.19	-0.02	-0.23	0.03	0.13	0.18	0.35	0.14	0.12	0.12

*: Significant correlations; *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$.

TABLE 6. Relationship between RPE Values and hormonal concentrations (GH, IGF-1 and IGFBP-3) for soccer players only.

Measurments	Soccer players	(RPE scores)	(r)
GH (nmol/L)			
T1 (16 weeks)	2.07 ± 0.48	7504 ± 3204.15	0.17
T2 (16 weeks)	2.62 ± 0.41	11872 ± 4021.39	0.18
T4 (24 weeks)	2.02 ± 0.47	15240 ± 2436.28	0.15
IGF-1 (nmol/L)			
T1 (16 weeks)	847.95 ± 38.02	7504 ± 3204.15	0.22 ^a
T2 (16 weeks)	914.20 ± 34.68	11872 ± 4021.39	0.29 ^a
T4 (24 weeks)	851.65 ± 43.97	15240 ± 2436.28	0.27 ^a
IGFBP-3 (nmol/L)			
T1 (16 weeks)	49.35 ± 4.52	7504 ± 3204.15	0.19
T2 (16 weeks)	51.30 ± 3.77	11872 ± 4021.39	0.21 ^a
T4 (24 weeks)	57.55 ± 5.86	15240 ± 2436.28	0.23 ^a

a : Significant correlations ; a: p< 0.05.



T0 : first test; T1: second test; T2: third test; T3: fourth test; T4: fifth test

FIGURE 1 - Study design: The experiment time-points for both soccer players and control groups

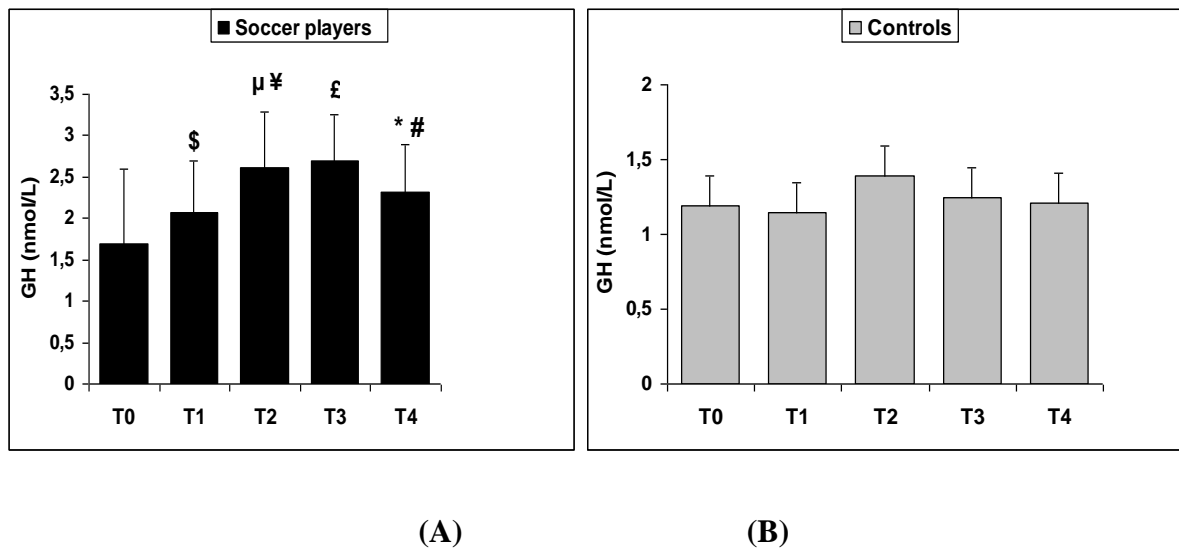
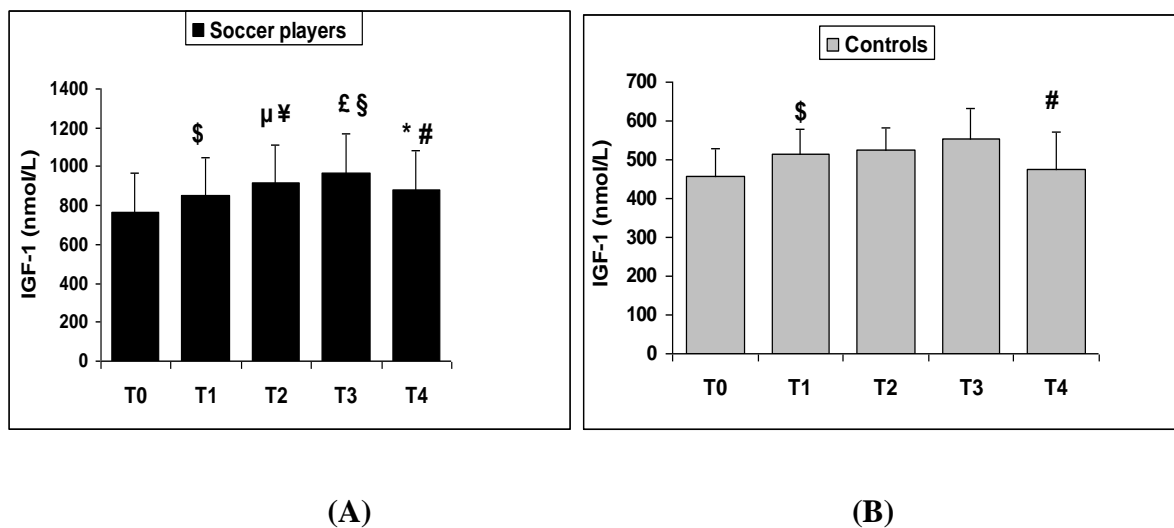
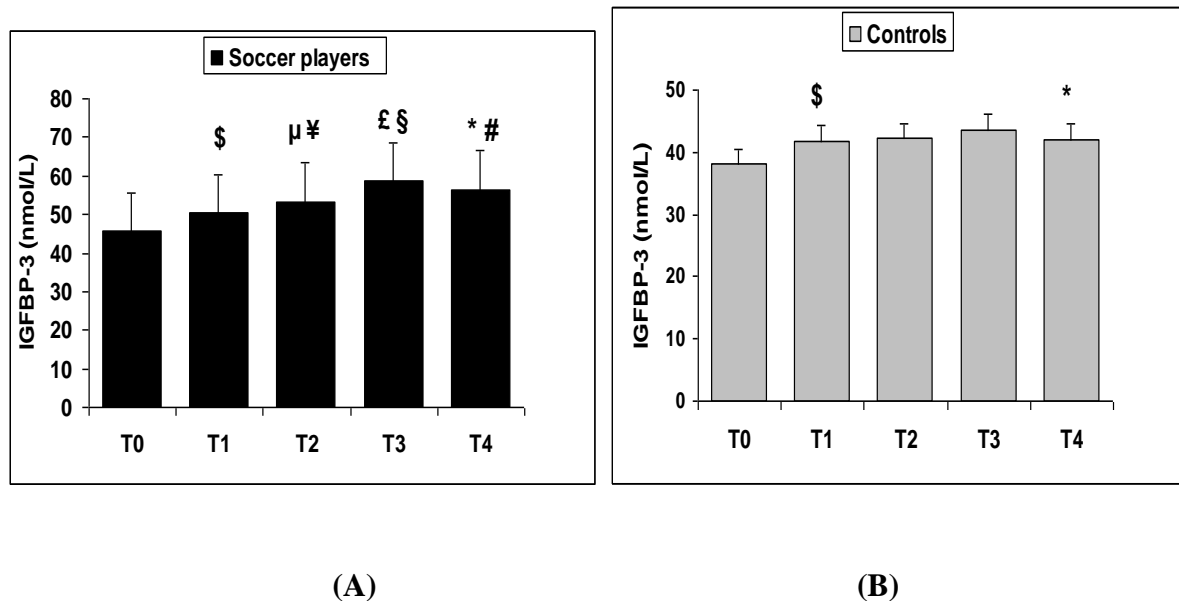


FIGURE 2 -Change in GH between each time period across 2 soccer seasons in young soccer players (A) and control subjects (B).



- \$, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T1
- μ, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T2
- £, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T3
- ¥, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T1-T2
- \$, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T2-T3
- #, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T3-T4
- *, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T4

FIGURE 3 -Change in IGF-1 and differences between each time point across 2 soccer seasons in young soccer players (A) and control subjects (B).



- \$, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T1
- μ, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T2
- £, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T3
- ¥, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T1-T2
- \$, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T2-T3
- #, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T3-T4
- *, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T4

FIGURE 4 -Change inIGFBP-3 and differences between each time point across 2 soccer seasons in young soccer players (A) and control subjects (B).

- \$, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T1
- μ, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T2
- £, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T3
- ¥, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T1-T2
- \$, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T2-T3
- #, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T3-T4
- *, ($p < 0.001$): Hormonal change between soccer players and controls from T0-T4

ARTICLE 4

Physical and hormonal changes (cortical-gonadotropic axis) with two years intense exercise training in elite young athletes

HAMMAMI M.A.^{1,2,3}, BEN ABDERRAHMAN A.^{1,2,4}, NEBIGH A.³, ZAOUALI.

M³BEN OUNIS O^{2,3}, TABKA Z.³, ZOUHAL H.¹

¹*Movement, Sport and Health Sciences Laboratory (M2S), UFR-APS, University of Rennes 2-ENS Cachan, Rennes, France.*

²*Institut Supérieur du Sport et de l'EPS de Tunis. Ksar Saïd, University of Manouba Tunisie.*

³*Laboratory of Physiology and Functional Explorations, Ibn Eljazzar Faculty of Medicine, University of Sousse, Tunisia.*

⁴*"Sport Performance Optimization" National Center of Medicine & Science in Sport (CNMSS), Tunis, Tunisia.*

Corresponding author: Professor H. ZOUHAL

Movement, Sport and Sciences laboratory (M2S).UFR-APS, University of Rennes 2, Avenue Charles Tillon, CS 24414, 35044 Rennes Cedex, France.

Phone number: +33.2.99.14.17.75.

Fax number: +33.2.99.14.17.74

E-mail: hassane.zouhal@univ-rennes2.fr

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the soccer players and control boys who participated in this study with great enthusiasm. We pay a great tribute to Tunisian Football Federation for its unfailing collaboration.

Abstract:

The purpose of this study was to investigate the effects of two soccer-training seasons on physical fitness and hormones concentrations of elite youth soccer players. Two groups of young boys participated in this study: 1) 20 soccer players (age 14.5 ± 0.4 years) training 8 to 10 hours per week and 2) 20 control subjects (age 14.3 ± 0.3 years). Anthropometric measurements, aerobic (Yo-Yo Intermittent Recovery test level 1 (YYIRT1)) and anaerobic soccer relevant performances (squat-jump (SqJ), countermovement-jump (CMJ), five jump test (5JT), and 5m, 10m and 30m sprints) and serum concentrations of Testosterone (T), Cortisol (C), sex hormone binding globulin (SHBG) and T/C Ratio, were assessed 5 times (from T0 to T4) during two competitive seasons. Data showed that the values of differences (Δ) are statistically significant ($p < 0.01$) in both groups in height and in body mass. The results demonstrate that the differences (Δ) are significant for young soccer players compared with controls for CMJ, SqJ, YYIRT1, $VO_{2\max}$ and 5J in all 5 times ($p < 0.01$). Soccer training was accompanied by significant alterations of hormonal concentration during two soccer training seasons follow-up. Additionally, hormonal concentrations (T) and T/C Ratio were positively correlated to CMJ, SqJ, YYIRT1 and $VO_{2\max}$. ($p < 0.05$).

This study provides results concerning anthropometric characteristics, physical fitness performances and hormonal concentrations for highly trained young soccer players. Based on these data, soccer participation of young elite players increased significantly Testosterone level and T/C ratio and decreased SHBG and Cortisol concentrations compared to control subjects.

Keywords: Soccer training, Hormones, Performances, elite youth academy.

INTRODUCTION

In football, international players runs between 10 and 13km during a match (Rampinini et al., 2007), so we can say that the majority of energy metabolism is based on aerobic metabolism, but it prevents the anaerobic metabolism plays a factor in this activity. Indeed, Mallo and Navarro (2008) reported that football is an intermittent sport, characterized by a high level of intense training load, in which players must lead to varying intensities distributed in acyclic.

Moreover, it is well accepted that physical training can affect the state of the gonadal axis hormones (Hackney et al 2003; Keizer et al 1989). Some investigations have reported the hormonal responses of soccer players during intensified training Minetto MA et al 2008 and during single game (Moreira et al 2009). But data from the literature on this subject vary according to the authors. In fact, and for testosterone Calbet et al. (1999) and Filaire et al. (2001) have shown that during periods of intensive training, the resting values of testosterone were lower than before the training period . While other investigations do not notice a change in testosterone levels (Nicklas et al. 1995 ; Mackinnon et al. 1997). Conversely, other studies (Hakkinen et Pakarinen , 1995 ; Kraemer et al. 1999)noted an increase in testosterone at rest. Similarly for cortisol, which many studies have indicated that improving performance in sports is associated with a significant increase in cortisol concentrations at rest (Hoogeveen et Zanderland 1996 ; Filaire et al. 2001) butelse were not agree and showed the opposite (Bosco et al. 1996 ; Bonifazi et al. 2000). However, several investigators reported no change in resting cortisol values (Mujika et al. 1996 ; Filaire et al. 1998, 2001). It seems that cortisol levels increase at rest when the training is particularly intense (Filaire et al. 2001a, Wahl et al 2010, Thorpe et al 2012). More then, training has a positive effect on the modulation of the T/C ratio for youth trained (Leite et al. 2011). Some authors have also observed that the high testostéronémie are positively correlated with strength in football players (Bosco et al. 1996 ; Bonifazi et al. 2001).

On the other hand, several authors reported a significant decrease in cortisol concentrations at rest after a period of training (Kirwan et al. 1990 ; Tabata et al. 1990 ; Staron et al. 1994).

But it is worth noting that the majority of these studies were cross-sectional and in most cases there is no control group, so little research in the literature have investigated the

effects of training on hormonal concentrations over a long period, especially in football (Hansen et al. 1999). Recently, one study focused on this area during a two-year follow-up. In fact, Vääntinen, T et al 2011 observed in youth Finnish soccer players changes in body composition, hormonal status and physical fitness. However, these results are not consistent since the players have regional level soccer and participants in this study were measured only at the start and the end of the follow-up period during two year. Moreover, to the best of our knowledge no longitudinal investigation (more than 2-yr.) has studied the impact of intense soccer practice in elite youth academy soccer players belonging to national team.

Consequently, the purpose of this study was to assess the effects of physical fitness levels on hormonal concentrations (*e.g.* Testosterone T, Cortisol C, T/C Ratio and sex hormone binding globulin SHBG) of elite youth soccer players belonging to Tunisian national team U17, during two seasons in a federal youth academy, and to analyze whether there are differences between elite young soccer players and control subjects.

We hypothesized that two high-level soccer-training seasons is accompanied with physical and physiological adaptations and can lead to lower testosterone concentration at rest and increased cortisol levels especially in difficult periods of seasons as at the end of the first season(T2) or at end of the second season(T4).

METHODS

Subjects

Forty boys were recruited to participate to our study. Twenty were resident in the youth academy of elite soccer players (Borj Cedria, Tunisia), were members of the national selection of Tunisia and they had for objective to prepare the preliminaries of the U-17 Championship of African Nations qualifier at the world cup and constituted the soccer group (age 14.5 ± 0.4 year at the beginning of the study). This group of elite players was selected from six regional centres of football throughout Tunisia. The first detection from these centres was done among 800 young male soccer players. They practice soccer 11 months a year, for at least 5 years at a rate of 5 sessions with one competitive game per week, in addition to their school physical education.

In general, soccer training sessions lasted ~1h 30 min, including about 15-20 min of warming up, low-intensity games and stretching exercises, 15-25 min of technical soccer exercises (kicking actions, dribbling, jumping, and running with fast accelerations and decelerations), 20-30 min of match practice, and 10 min of active recovery. The criteria used for selection, is based on technical tests and physical fitness parameters. The period of formation in the Football Federation Tunisian youth academy spread over two years

The other twenty three subjects (age 14.3 ± 0.3 year at the beginning of the study), were assigned to the control group (non-athletic boys). They participated only in the compulsory physical education curriculum at school (two weekly sessions of 50 min.). They were randomly chosen and were representative of the general population.

Experimental procedure

We evaluated the tests of the study in five time-points for soccer players and control subjects:

- First test, at baseline; in the starting of a preparatory period (T0) in October 2008.
- Second test, (T1) at February 2009 in the middle of the first season.
- Third test, (T2) at May 2009, the end period of the first competitive season.
- Fourth test, (T3) at November 2009.
- Finally, the Fifth test, (T4) in the end of May 2010, the end period of the second competitive season.

The measurements were realized on 2 days. On the first testing day, after a standardized warm-up of 15 minutes, consisting of low-intensity running, followed by a series of exercises (high knee lift, butt kicks, straight line skipping) and then short accelerations, subjects have performed the Squat Jump, Counter movement Jump, Five jump Test and 30m sprint. On the second testing day, the subjects performed after a standardized warm-up a Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 1 (YYIRT).

Puberty stage assessment

The puberty stage was the indicator of biological maturity status. It was determined and recorded by a paediatrician experienced in the assessment of secondary sex characteristics according to the method of Tanner (Tanner, 1975). Children at pubertal development stages 1-5 were evaluated. According to their pubescent status, the young soccer players and the control group belonged to Tanner stage (2-3).

Anthropometry Characteristics

Each participant came to the laboratory for a medical examination and anthropometric measurements performed by a paediatrician at each period (T0, T1, T2, T3 and T4). Body height and body mass were measured with standard techniques to the nearest 0.1 cm and 0.1 kg, respectively for each subject. To estimate the adiposity, skin-fold thickness were measured at four sites on the left-side of the body (triceps, biceps, subscapular and suprailiac) using a Harpenden skin-fold calliper (British Indicators Ltd., Luton) for calculation of percent body fat according to the equations described by Durnin et al. 1985. All measurements were taken in the morning at 7h30 by the same investigator at each period (T0, T1, T2, T3 and T4).

Physical fitness Characteristics

(SqJ), starting with knees bent at 90° and without previous counter movement and the counter-movement-jump (CMJ), starting from a standing position allowing for counter movement with the intention of reaching knee bending angles of around 90° just before propulsion. The ground reaction force generated during these vertical jump were estimated with an ergo jump (Opto Jump Microgate - ITALY). In addition, the subjects performed a five-jump-test (5J); each subject performed 3 jumps inter-spersed with 1-minute rest between each jump, and the best was used for analysis.

Running speed test: The participants performed three maximal 30-m sprints, was measured with an infrared photoelectric cell (Cell Kit Speed Brower, USA). During the 3-minute recovery periods in-between, the participants walked-back to the starting line and then waited for the next sprint. The participants commenced the sprint when ready from a standing start 0.5 m behind the first timing gate. Stance for the start was consistent for all participants. The best (fastest) 30 m sprint time was selected for analysis. The results show that these tests were highly repeatable: 30-m sprint (intra-class correlation) (ICC = 0.96), SJ (ICC = 0.93), CMJ (ICC = 0.90), 5-J (ICC = 0.89).

Yo-Yo Intermittent Recovery test level 1 performance: The YYIRT1 was used to estimate VO_{2max} based on the equation from Bangsbo et al. (2008) whereby: VO_{2max} (ml/min/kg) = YYIRT1 distance (m) * 0.0084 + 36.4. Briefly, the YYIRT1 consists of repeated 2×20m runs back and forth between the starting, turning, and finishing line at a progressively increased speed controlled by an audio metronome from a calibrated CD player. The subjects had a 10-s active rest period (decelerating and walking back to the starting line) between each running bout. When the subjects failed twice to reach the finishing line in time, or decided that he could no longer run for the imposed pace, the total distance covered was recorded. All tests were made by the same investigators, scheduled at the same time of day, carried out in the same order and using the same apparatus at each period.

Blood analysis

Blood samples were withdrawn from the participants of two groups on five times at T0, T1, T2, T3 and T4 in the same week of physical tests and anthropometric measurements. Blood samples were made between 7:00 and 8:30 following overnight fasting.

The blood samples were centrifuged for 10 minutes at 4° at 3000 rpm and the extracted serum was stored frozen at - 80°C until assays.

The plasma level of testosterone (T), Cortisol (C) and sex hormone binding globulin (SHBG) were measured by electrochemiluminescence immunoassay using the Elecsys 2010 analyzer (Roche Diagnostics, Switzerland). Inter-assay coefficient of variation (CV) was 8.4-9.1% and intra-assay CV was 7.8-9.6%. Assay sensitivity was 0.08 ng/ml.

Statistical Analysis

Results are expressed as means \pm standard deviations (SD). The analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was used to check significant differences between groups in anthropometric, physical parameters and hormonal concentrations. Significant differences were assumed when $p < 0.05$. The data were analyzed by using SPSS for Windows (version 16.0; SPSS Inc, Chicago). All variables used in the study were checked for normality of distribution before the analyses. Kolmogorov-Smirnov tests were used for each variable. The correlations between independent variable namely T, C, SHBG, T/C and physical performances were determined by simple regression. The reliability of each test was assessed by intra-class correlations (ICCs).

Results

Table 1 showed the anthropometric data of the soccer players and control groups. Significant differences were observed in body mass, height and % of body fat for soccer players compared with the control group through the assessment points of various periods T0 to T4 ($p < 0.001$).

Table 2 shows changes in anthropometric parameters (body mass, height and % body fat) in young soccer players compared with the control group through the assessment points of various periods T0-T1 (first follow-up period): T1-T2 (second follow-up period): T2-T3 (third follow-up period): T3-T4 (fourth follow-up period): T0-T4 (Total period follow-up). From these results, we observe that for soccer players, the variations values (Δ) are statistically significant in height and in weight ($p < 0.01$). However, for % body fat, we find significant difference only in total period T0-T4. For control subjects significant Δ differences are observed in different follow-up periods for height. As the same results for weight, except in the first follow-up period: T0-T1.

Concerning the percentage of body fat for youth soccer players decrease significantly mainly in the total followed period (T0-T4) ($p < 0.01$), but for control subjects no significance evolution was observed in all different follow-up periods.

The evolution of physical parameters (CMJ, SqJ, 5J, 30m Sprint, YYIRT (m) and VO2max) in young soccer players compared with the control group throughout the measurement points of various periods T0-T1 (first follow-up period): T1-T2 (second follow-

up period) : T2-T3 (third follow-up period) : T3-T4 (fourth follow-up period) : T0-T4 (Total period) are presented in **Table 3**. The results demonstrate that the Δ differences are significant for young soccer players compared with controls for CMJ, SqJ, YYIRT, VO₂max and 5J ($p < 0.01$).

Hence, 30m-sprint performances are statistically significant for soccer players during the period T2-T3 and the final period compared with control subjects. For this last group some significant differences Δ are recorded for CMJ in T1-T2, SqJ in T3-T4, 5J in T0-T1 and T2-T3. In the Total period (T0-T4) we observe significant differences (Δ) in two groups at all parameters, but these differences were most distinguished in soccer players than controls (**Table 3**).

The evolution hormonal concentrations of soccer players and control subjects according to different periods during two soccer seasons follow-up are presented in **Table 4**. The results demonstrate that young soccer players significant differences are observed for Testosterone in (T1-T2) and (T2-T3) periods ($p < 0.01$) and in the total period (T0-T4) ($p < 0.001$). No significant differences for controls throughout different periods. Significant differences (Δ) of Testosterone concentrations between young soccer players and control subjects were observed in (T1-T2), (T2-T3) and (T4-T0) ($p < 0.01$). Cortisol concentrations showed significant differences for young soccer players in (T0-T1), (T1-T2) and (T0-T4) ($p < 0.01$). Therefore, the significant differences existed of control subjects in (T2-T3), (T3-T4) and (T0-T4) ($p < 0.01$). Significant differences (Δ) cortisol concentrations between soccer players and control subjects were observed in (T2-T3), (T3-T4) and in (T0-T4) ($p < 0.01$). Concerning, the evolution of SHBG concentrations present significant difference in (T0-T4) for soccer players and controls subjects. Significant differences (Δ) SHBG between young soccer players and control subjects were observed in (T1-T2) and (T0-T4) ($p < 0.01$).

Significant differences of T/C ratio concentrations for soccer players were observed in (T1-T2) and (T0-T4) ($p < 0.01$). For controls, significant differences existed in (T0-T1) and (T0-T4) ($p < 0.01$). Significant differences (Δ) of T/C ratio between soccer players and control subjects were observed in different periods of the study except in (T2-T3).

Table 5 shows that for soccer players, Testosterone (T) was significantly correlated with CMJ at T0 ($r = 0.33$), T4 ($r = 0.31$) and with SqJ at T0 ($r = 0.27$), T4 ($r = 0.29$). Same correlation was observed between (T) and YYIRT11 (m) at T0 ($r = 0.26$), T4 ($r = 0.31$) and

with VO₂max at T0($r = 0.30$), T4($r=0.31$) ($p<0.05$). For T/C ratio, a positive correlation was observed with CMJ at T0 ($r=0.33$), with SqJ at T0 ($r=0.34$), T4 (0.34) and with YYIRT (m) at T4($r=0.38$), VO₂ at T4 ($r=0.33$)($p<0.05$). However, Regression analysis showed no significant correlations are recorded between cortisol and SHBG concentrations and physical fitness parameters.

Table 6 shows that for soccer players, Testosterone is significantly correlated with RPE at T4 ($r=0.27$), ($p<0.05$). Cortisol is significantly correlated with RPE at T2 ($r=0.29$) and at T4 ($r=0.27$). For SHBG, a significant correlation was observed only with RPE at T4 ($r=0.31$) ($p<0.05$).

Figure 1 shows significant differences in Testosterone between soccer players and controls at T1 and T2 ($p<0.01$). The same differences are observed at T3 and T4 ($p<0.001$). **Figure 2** demonstrate significant differences in Cortisol between soccer players and controls at T0 and T3 ($p<0.01$). Additionally, for SHBG, significant differences are observed between the two groups at T0, T1, T2 and T3 ($p<0.01$) (**Figure 3**). Therefore, T/C ratio concentration illustrate significant differences between the young soccer players compared to the matched-age controls at T1 ($p<0.01$) and at T0, T2, T3 and T4 ($p<0.001$) (**Figure 4**).

Discussion

The main purpose of our investigation was to assess the effects of physical fitness levels on hormonal concentrations (Testosterone, Cortisol, SHBG and T/C) of elite youth soccer players belonging to Tunisian national team U17, during two seasons in a federal youth academy, and to analyze whether there are differences between elite young soccer players and control subjects. According to the main findings, our results showed significant alterations in the hormonal concentrations (T, SHBG, C and T/C) plasma concentrations) and physical fitness parameters in the young soccer players compared to the control subjects matched for age during the two season follow-up. In fact these changes were mainly seen between T0 and T4. This may represent an adaptation to exercise with soccer training. Hence, total plasma testosterone and T/C ratio was strongly correlated with indicators of the power of the lower limbs (CMJ, SqJ and 5J) and aerobic performances (VO₂ max, YYIRT) only in young soccer players.

With respect to the anthropometric characteristics, in this study, the young soccer players presented similar data when compared to soccer players analysed in national DA Silva 2008 and international (Gil et al. 2007) studies. Furthermore, for height a significant increase was observed in the elite soccer players compared to the control group. Our results support the idea that sport has beneficial effects on growth (Mackelvie et al. 2002). And agree with previous studies that reported that young soccer players were taller (Gil et al. 2007) and skeletally more mature (Malina et al. 2000) compared to their chronological age counterparts.

In the present investigation, a substantial difference was also observed in weight between the young players and control subjects during the two soccer season at five time-points. In the elite soccer players, weight decreases significantly from T0 to T3, than we show a little increase in T4, while for controls a significant increase of weight was observed from T0 to T4. The training program can mainly explain this decrease during the period between T0 and T3 observed in this group in the youth academy (Gil et al., 2007). Concerning percentage body fat parameter we observed significant differences between the two groups throughout the study period. As a result, for youth soccer players the body fat decrease significantly mainly in the total followed period (T0-T4) ($p < 0.01$), but for control subjects no significance differences were observed in the same period. Therefore, the Percentage of body fat is a standard measurement in soccer because better players tend to be leaner than lower level players, even in the younger age groups (Gravina et al. 2008).

In one of the first study, using hormonal concentrations determined the effects of soccer participation on the young soccer players compared to the control subjects between each point-time during two soccer seasons follow-up.

Testosterone and cortisol are playing a significant role in metabolism of protein as well as carbohydrate metabolism. Both are competitive agonists at the receptor level of muscular cells (Urhausen et al 1995). Our results demonstrate that significant differences in Testosterone and T/C ration between soccer players and controls throughout two soccer seasons follow-up. In the similar period, total Testosterone and T/C ration increased significantly on soccer players compared to control subjects in (T1-T2), (T2-T3) and Total period (T0-T4). However, for cortisol significant decreases were observed between the two groups in (T2-T3), (T3-T4) and Total period (T0-T4). The significant exercise induced increased responses of testosterone and T/C after this period may be were connected with

current training workload and program of tapering with decreasing the cortisol blood levels (Keizer et al 1998).

For the same period follow-up, Hansen et al 1999 found higher serum testosterone concentrations for the elite soccer players compared to the non elite players. As observed by other authors (Kraemer et al 2004; Bosco et al 1996), the C and T levels found in the subjects remained within the normal range reported in the literature (Makras et al 2005). In fact, the serum concentrations of cortisol increased significantly between each point-time follow-up. This behavior has been verified by others studies with soccer players (Filaire et al 2001; kraemer et al 2004). Namely, the exaggerated cortisol responses after training period which would be connected with high activity of adaptation process and associated with reaching top performances were determining in this experiment.

In contrast, our result showed increases the levels of T and T/C related with decreases the levels of C for young soccer players compared to controls. Considering that soccer is characterized as a high intensity intermittent exercise (Eliakim et al 2009, Leit et al 2011), the prevalence of a long-term training period may explain the responses of the anabolic and catabolic hormones in the present investigation (kraemer et al 1999; Hakkinen et al 1995).

In addition, Grandys et al 2009 have demonstrated that short-term, moderate intensity and low volume endurance training can significantly increase testosterone concentration in previously untrained men.

Significant relationships between T levels and fitness parameters (CMJ, SqJ, YYIRT and VO₂max) have been found in our young soccer players in the beginning of the study and after two soccer seasons follow-up. In the current experiment, we showed that Testosterone levels was positively correlated with CMJ($r = 0.28$; $r = 0.31$) , SqJ ($r = 0.27$; $r = 0.29$), YYIRT (m) ($r = 0.26$; $r = 0.31$) and VO₂max($r = 0.30$; $r = 0.31$) at T0 and T4 respectively. We consider that the positive responses of the physiological performances observed after two seasons soccer training may be related to the fact that the T levels increase throughout each point-time follow-up at T1- T4.(Hanssen et al 1999; Grandys et al 2009; DA Silva et al 2011).

In previous studies conducted in untrained men (Grandys et al 2009) and trained young men (Derbré et al 2010) levels of fitness are known to be correlated with circulating

levels of total Testosterone. Only a few studies which could tentatively assert that testosterone increases with adaptive training and decreases with overtraining (Urhausen et al 1995).

Such correlations indicate that in healthy adolescents, high-intensity exercise is associated with increased activity of the gonadal hormone system favoring an anabolic state.

Exercise and regular physical activity lead to changes in testosterone (Cumming et al 2000). The results of the literature concerning the adaptation of this hormone in training are also divergent (Cumming et al 2000). This adaptation of the gonadotropic axis like the somatotrophic axis depends on several factors, including the characteristics are involved in training a sport activity to another (Cumming et al 2000, Eliakim et al 2006).

Data from the present study illustrate a modification in SHBG levels in young soccer players and control subjects. Thus, significant differences were observed in SHBG between the two groups at T0, T1, T2 and T3 after two season training. This was accompanied by an increase in total plasma testosterone (T) concentrations, whereas a decrease in sex hormone-binding globulin (SHBG) concentrations was detected. In addition, for SHBG, a significant evolution was observed in total period for the young players compared to the controls. Accordingly, SHBG levels declined with advancement of puberty in both boys and girls (Sorensen, 2009). SHBG levels were strongly dependent on body composition and sex steroid levels in children with normal and precocious puberty.

Studies on SHBG sensitivity in puberty are needed to better understand the interaction between body composition and gonadal maturation (Sørensen, 2007).

Nevertheless, in our study, no association was observed between SHBG and physical performances in young soccer players and control subjects in all point measurements throughout two soccer seasons.

Hardly any well-founded data with respect to athletes in intensive training periods or in a state of overtraining exist for the other hormones. Whether the shift in hormonal interrelations is caused by adaptation or dysadaptation.

The subjective rating of exertion supports the assumptions of relatively strenuous physiological load. Anyway, RPE has been shown to be a useful tool for prescribing exercise intensity based on its relationship with physiological indicators of exercise stress (Irving et al.

2006) and does not appear to be affected by exercise modality or training state (Hetzler et al. 1991; Seip et al. 1991). Certainly, elite young soccer player must be prepared to perform and sustain high loads of training observed at elite level.

As well the relationships between physical parameters and both Testosterone serum and T/C ratio in our results showed significant correlations between hormonal concentrations and RPE-based training load values determined by the scales of perceived exertion in young soccer players. The remedy for this association between hormonal concentrations and effort perception may be due to an increase in training intensity of the young soccer players and a tolerable training load during the season.

We consider that the positive responses of the physical performances observed in after this soccer training seasons may be related to the fact that the T/C ratio increase more throughout all the period follow-up (Adlercreutz et al. 1986).

This finding is in agreement with most of the recently researches that have used the rating of perceived exertion addressing to children's to estimate effort perception (Marinova et al. 2008, Brink et al. 2010, Mortatti et al 2012).

For the period of teenage years, similar to observations made in younger players it seems that monitoring the training load of soccer player prevent overtraining syndrome from developing (Tanskanen et al. 2011). The results confirm that serum T, T/C, C and SHBG could be useful tools to indicate whether high-intensity in official competitions (Mortatti et al 2012) and in training program (Brink et al. 2010) is too strenuous.

Conclusion

In conclusion, this finding analyses the interaction between hormones (T, T/C, C and SHBG) and training load effects during a long-term soccer training (two season follow-up) in elite youth academy soccer players. This study provides results concerning anthropometric characteristics, physical fitness performances and hormonal concentrations for highly trained young soccer players. Based on these data, soccer participation of young elite players increased significantly Testosterone level, T/C ratio and decreased SHBG and cortisol compared to control subjects; this may represent an adaptation to exercise with soccer training. Gonadal hormone system may be considered as endocrine markers of soccer physical activity in youth academy soccer players.

References

- Bangsbo J. The physiology of soccer with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiol Scand Suppl* 2008; 151:1-155.
- Bosco C, Tihanyi J, Viru A. Relationships between field fitness test and basal serum testosterone and cortisol levels in soccer players. *Clin Physiol* 1996;16:317—22.
- Brink MS, Nederhof E, Visscher C, Schmikli SL, Lemmink KA. Monitoring load, recovery, and performance in young elite soccer players. *J Strength Cond Res*. 2010 Mar;24(3):597-603.
- Celani MF, Grandi M. The pituitary-testicular axis in nonprofessional soccer players. *Exp Clin Endocrinol* 1985;94:244—52.
- Chamari K, Hachana Y, Ahmed YB, Galy O, Sghaïer F, Chatard JC, et al. Field and laboratory testing in young elite soccer players. *Br J Sports Med* 2004;38:191-6.
- Debré. F, Vincent S, Maitel B, Jacob C, Delamarch P, Delamarch A, Zouhal H. Androgen Response to sprint Exercise in Young Men. *Int J Sports Med* 2010;31:291-297.
- DA Silva, C.D., Bloomfield, J., & Bouzas Marins, J.C. (2008). A review of stature, body mass and maximal oxygen uptake profiles of U17, U20 and first division players in Brazilian soccer. *Journal of Sports Science and Medicine*, 7, 309-319.
- Filaire E, Bernain X, Sagnol M, Lac G. Preliminary results on mood state, salivary testosterone: cortisol ratio and team performance in professional soccer team. *Eur J Appl Physiol* 2001;86:179-84.
- Keizer HA. Neuroendocrine aspects of overtraining. In *Overtraining in Sport*, ed. Kreider RB, Fry AC, O'Toole ML, 1998;145:167. Champaign IL: Human Kinetics.
- Filaire E, Legrand B, Lac G, Pequignot JM. Training of elite cyclists: effects on mood state and selected hormonal responses. *J Sports Sci* 2004;22:1025—33.
- Gil, S., Ruiz, F., Irazusta, A., Gil, J., & Irazusta, J. (2007) Selection of young soccer players in terms of anthropometric and physiological factors. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 47, 25-32.
- Gorostiaga EM, Izquierdo M, Ruesta M, Iribarren J, GonzálezBadillo JJ, Ibáñez J. Strength training effects on physical performance and serum hormones in young soccer players. *Eur J Appl Physiol* 2004;91:698—707.
- Gravina, L, Gil, S, Ruiz, F, Zubero, J, Gil, J, and Irazusta, J. Anthropometric and physiological differences between first team and reserve soccer players aged 10–14 years at the beginning and end of the season. *J Strength Cond Res* 22: 1308–1314, 2008.

Grandys M, Majerczak J, Duda K, Zapart-Bukowska J, Kulpa J, Zoladz JA. Endurance training of moderate intensity increases testosterone concentration in young, healthy men. *Int J Sports Med*. 2009 Jul;30(7):489-95.

Hackney AC, Szczepanowska, E, Viru AM. Basal testicular testosterone production in endurance-trained men is suppressed. *Eur J Appl Physiol* 2003; 89: 198-201.

Hansen L, Bangsbo J, T wisk, and K. Klausen. Development of muscle strength in relation to training level and testosterone in young male soccer players. *J Appl Physiol*. 1999; 87:1141-1147

Hoff, J. Training and testing physical capacities for elite soccer players. *J Sports Sci* 23: 573–582, 2005.

Kanaley JA, Weltman JY, Veldhuis JD, Rogol AD, Hartman ML, Weltman A. Human growth hormone response to repeated bouts of aerobic exercise. *J Appl Physiol*. 1997; 83:1756–1761.

Keizer H, Janssen GM, Menheere P, Kranenburg G. Changes in basal plasma testosterone, cortisol, and dehydroepiandrosterone sulphate in previously untrained males and females preparing for a marathon. *Int J Sports Med* 1989; 10(suppl 3): s139-s145.

Krammer WJ, French DN, Paxton NJ, Hakkinen K, Volek JS, Sebastianelli WJ, Putukian M, Newton RU, Rubin MR, Gomez AL, Vescovi JD, Ratames NA, Fleck SJ, Lynch JM, Knuttgen HG. Changes in exercise performance and hormonal concentrations over a big soccer season in starters and nonstarters. *J Strength Cond Res* 2004; 18: 121-128.

Kraemer WJ, French DN, Paxton NJ, Häkkinen K, Volek JS, Sebastianelli WJ, et al. Changes in exercise performance and hormonal concentrations over a big ten soccer season instarters and nonstarters. *J Strength Cond Res* 2004;18:121-8.

Lupo C, Baldi L, Bonifazi M, Lodi L, Martelli G, Viti A, et al. Androgen levels following a football match. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1985;54:494—6.

Makras P, Koukoulis GN, Bourikas G, Papatheodorou G, Bedevis K, Menounos P, et al. Effect of 4 weeks of basic military training on peripheral blood leucocytes and urinary excretion of catecholamines and cortisol. *J Sports Sci* 2005;23:825—34.

Malina R.M, Peña Reyes M.E, Eisenmann JC, Horta L, Rodrigues J, Miller, R. Height, mass and skeletal maturity of elite Portuguese soccer players aged 11-16 years. *Journal of Sports Sciences*. 2000. 18: 685-93.

Minetto MA, Lanfranco F, Tibaudi A, Baldi M, Termine A, Ghigo E. Changes in awakening cortisol response and midnight salivary cortisol are sensitive markers of strenuous Training-induced fatigue. *J Endocrinol Invest* 2008 ; 31: 16-24.

Nemet D, Eliakim A. Growth hormone-insulin-like growth factor-1 and inflammatory response to a single exercise bout in children and adolescents. *Med Sport Sci*. 2010; 55:141-55.

Reilly T. An ergonomics model of the soccer training process. *J Sports Sci* 2005; 23:561-72.

Silva ASR, Santhiago V, Papoti M, Gobatto C. Psychological, biochemical and physiological responses of Brazilian soccer players during a training program. *Sci Sports* 2008; 23:66-72.

Steinacker JM, Lormes W, Reissnecker S, Liu Y (2004). New aspects of the hormone and cytokine response to training. *Eur J Appl Physiol* 91(4):382–391

Tanner, J.M. Growth endocrinology of the adolescence. In: Gardner L, editor. *Endocrine Genetic Diseases of childhood and Adolescence*. 1975; Philadelphia: WB Saunders p. 14 - 64.

Tanskanen MM, Kyröläinen H, Uusitalo AL, Huovinen J, Nissilä J, Kinnunen H, Atalay M, Häkkinen K. Serum sex hormone-binding globulin and cortisol concentrations are associated with overreaching during strenuous military training. *J Strength Cond Res*. 2011 Mar; 25(3):787-97.

Tsolakis C, Xekouki P, Kaloupsis S, Karas D, Messinis D, Vagenas G, Dessypris A. The influence of exercise on growth hormone and testosterone in prepubertal and early-pubertal boys. *Hormones (Athens)*. 2003; 2:103-112.

Urhausen A, Gabriel H, Kindermann W. Blood hormones as markers of training stress and overtraining. *Sports Med* 1995; 20:251—76.

Vänttinen, T, Blomqvist, M, Nyman, K, and Häkkinen, K. Changes in body composition, hormonal status, and physical fitness in 11-, 13-, and 15-year-old Finnish regional youth soccer players during a two-year follow-up. *J Strength Cond Res*. 2011; 25:3342-51

Weltman A, Weltman JY, Womack CJ, Davis SE, Blumer JL, Gaesser GA, Hartman ML
Exercise training decreases the growth hormone (GH) response to acute constant-load
exercise. Med Sci Sports Exerc. 1997 May;29(5):669-76.

Table 1: Anthropometric characteristics of soccer players and control subjects determined during two-soccer seasons follow-up (mean \pm SD).

Measurements	Soccer players (n = 20)	Controls (n = 20)	P Values	Δ
Weight (kg)				
T0	69.0 \pm 5.7	52.7 \pm 12.4	0.001	16.3**
T1	66.6 \pm 5.5	53.4 \pm 12.6	0.001	13.2**
T2	67.9 \pm 5.3	54.55 \pm 12.	0.001	13.3**
T3	68.7 \pm 5.4	56.6 \pm 12.3	0.001	12.1**
T4	70.0 \pm 5.3	57.8 \pm 11.9	0.001	12.1**
Height (cm)				
T0	174.5 \pm 3.5	167.7 \pm 8.8	0.01	6.7*
T1	176.0 \pm 3.4	168.2 \pm 8.9	0.01	7.7*
T2	178.2 \pm 3.1	170.1 \pm 8,9	0.001	8.0**
T3	181.0 \pm 3.4	171.8 \pm 8.8	0.001	9.2**
T4	184.2 \pm 3.8	173.25 \pm 9.	0.001	10.9**
%Body fat (%)				
T0	12.8 \pm 3.0	17.9 \pm 2.9	0.01	-5.1*
T1	12.2 \pm 2.9	16.6 \pm 2.6	0.01	-4.4*
T2	11.4 \pm 2.6	16.6 \pm 2.2	0.01	-5.1*
T3	10.8 \pm 1.4	16.7 \pm 2.2	0.001	-5.9**
T4	10.1 \pm 1.0	16.3 \pm 2.4	0.001	-6.2**

- Significant differences between soccer players and control subjects. * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

Table 2: Evolution of anthropometric characteristics of soccer players and control subjects determined during two-soccer seasons follow-up (mean \pm SD).

Measurements	Soccer players (n = 20)	Controls (n = 20)
Weight (kg)	Δ	Δ
T0-T1	-2.4*	0.7
T1-T2	1.2*	1.1*
T2-T3	0.8*	2.0*
T3-T4	1.2*	1.2*
T0-T4	0.9*	5.1**
Height (cm)	Δ	Δ
T0-T1	1.4*	0.4*
T1-T2	2.2*	1.8*
T2-T3	2.8**	1.7*
T3-T4	3.2**	1.4*
T0-T4	8.7**	5.4**
%Body fat (%)	Δ	Δ
T0-T1	-0.5	-1.3
T1-T2	-0.7	0.0
T2-T3	-0.5	0.1
T3-T4	-0.7	0.4
T0-T4	-2.6*	1.5

- Significant differences of evolution between each point-time during two soccer seasons follow-up on young soccer players and control subjects. * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

Table 3: Evolution of Physical fitness parameters of soccer players and control subjects determined during two-soccer seasons follow-up(mean \pm SD).

Variables	CMJ (cm)		SqJ (cm)		5J (cm)		30m (s)		YYIRT (m)		VO2 max (ml/min/kg)	
Groups	S P	C	S P	C	S P	C	S P	C	S P	C	S P	C
T0-T1	3.12 **	0.93£	1.80 **	0.25£	1.31 **	0.44*£	-0.03	-0.02	744 **	18£	5.35 **	0.10£
T1-T2	2.22**	1.57*£	1.40*	0.01£	0.36	0.42	-0.03	-0.01	326*	90£	2.30*	0.03£
T2-T3	5.27 **	0.97£	3.43 **	0.72£	0.57*	0.63*	-0.17*	-0.07£	224**	72£	1.11*	0.62£
T3-T4	2.13 **	1.08£	0.39*	0.48*£	1.21**	0.51£	-0.04	-0.05	262 **	8£	1.87 **	0.61£
T0-T4	12.62 **	3.85**£	7.02 **	1.46 **£	2.73 **	1.14**£	-0.27**	-0.15**£	1108 **	188**£	8.40 **	1.36 **£

- Significant difference (Δ) of physical fitness parameters between soccer players and control subjects. £ : $p < 0.01$.

- Significant differences of evolution between each period-time during two soccer seasons follow-up on young soccer players and control subjects. * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

Table 4: Evolution of hormonal concentrations of soccer players and control subjects according to different periods during two soccer seasons follow-up (mean \pm SD).

Variables	Testosterone		Cortisol		SHBG		T/C	
	Δ		Δ		Δ		Δ	
Groups	S P	C	S P	C	S P	C	S P	C
T0-T1	0,05	0,11	-73,73*	8,11£	-1,87	-2,33	0,002	0,006*£
T1-T2	0,70*	0,05£	-72,94*	18,13	0,01	-2,15£	0,003*£	-0,002
T2-T3	0,44*	-1,14£	-7,85	-142,0*£	-1,89	-1,68	0,001	0,003
T3-T4	0,27	1,22	-10,61	91,96*£	-3,48	-0,18	0,002£	-0,002
T0-T4	1,46**	0,24£	-166,13*	-23,82*£	-7,97*	-6,34*£	0,008*£	0,005*

- Significant difference (Δ) of hormonal concentrations between soccer players and control subjects. £ : $p < 0.01$.

- Significant differences of evolution between each period-time during two soccer seasons follow-up on young soccer players and control subjects. * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

Table 5: Relationship between physical fitness parameters and hormonal concentrations (T, C, SHBG and T/C)
for young soccer players in T0 and T4.

Variables	CMJ (cm)		SqJ (cm)		5J (cm)		30m (s)		YYIRT (m)		VO2 max (ml/min/kg)	
Correlation	(r)		(r)		(r)		(r)		(r)		(r)	
Periods	T0	T4	T0	T4	T0	T4	T0	T4	T0	T4	T0	T4
Testosteron (nmol/L)	0,28*	0,31*	0,27*	0,29*	0,21	0,23	0,09	0,07	0,29*	0,31*	0,30*	0,33*
Cortisol (nmol/L)	0,17	0,19	0,14	0,17	0,15	0,16	0,17	0,16	0,17	0,24	0,21	0,22
SHBG (nmol/L)	0,20	0,21	0,22	0,24	0,09	0,13	0,04	0,05	0,08	0,12	0,15	0,16
T/C	0,33*	0,20	0,15	0,21	0,34*	0,39*	0,17	0,15	0,18	0,38*	0,14	0,33*

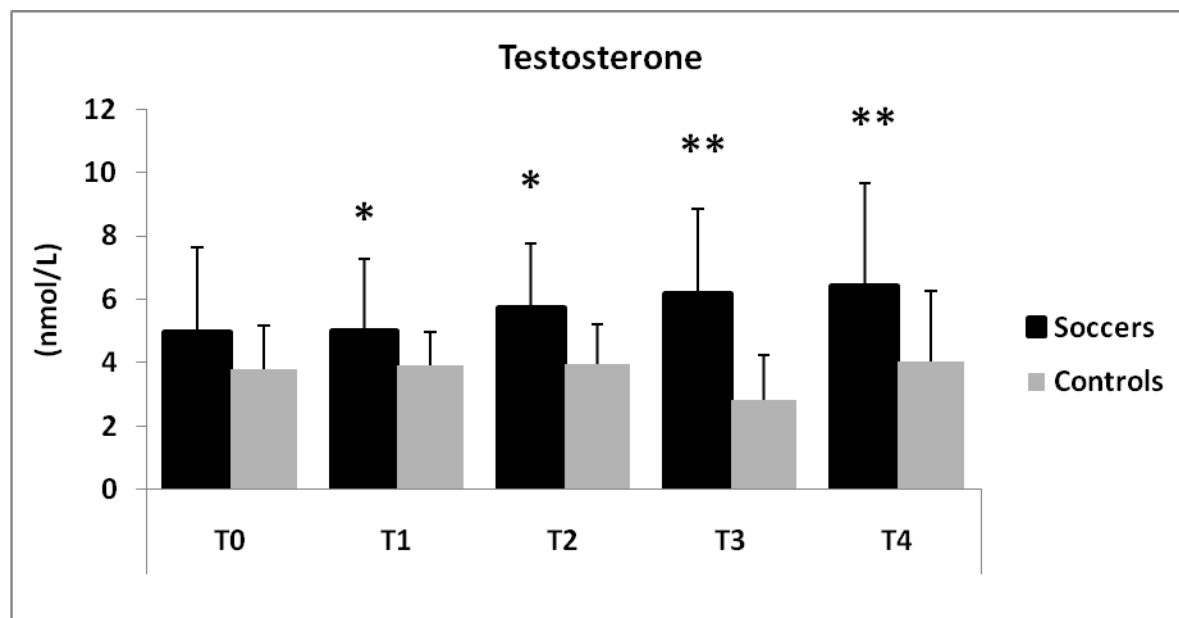
- Significant correlations; *: $p < 0.05$.

Table 6: Relationship between RPE Values and hormonal concentrations
(Testosterone, Cortisol, SHBG and T/C).

Measurments	Soccer players	(RPE score)	(r)
Testosterone (nmol/L)			
T1 (16 weeks)	5.03 ± 2.24	7504 ± 3204.15	0.18
T2 (16 weeks)	5.73 ± 2.03	11872 ± 4021.39	0.25
T4 (24 weeks)	6.44 ± 3.20	15240 ± 2436.28	0.27*
Cortisol (nmol/L)			
T1 (16 weeks)	489.12 ± 151.21	7504 ± 3204.15	0.12
T2 (16 weeks)	475.18 ± 110.67	11872 ± 4021.39	0.29*
T4 (24 weeks)	396.72 ± 137.83	15240 ± 2436.28	0.27*
SHBG (nmol/L)			
T1 (16 weeks)	43.91 ± 3.72	7504 ± 3204.15	0.14
T2 (16 weeks)	43.18 ± 5.24	11872 ± 4021.39	0.21
T4 (24 weeks)	37.18 ± 3.21	15240 ± 2436.28	0.31*
T/C Ratio			
T1 (16 weeks)	0.0075±0.0044	7504 ± 3204.15	0.16
T2 (16 weeks)	0.0085±0.0037	11872 ± 4021.39	0,15
T4 (24 weeks)	0.012±0.0041	15240 ± 2436.28	0,18

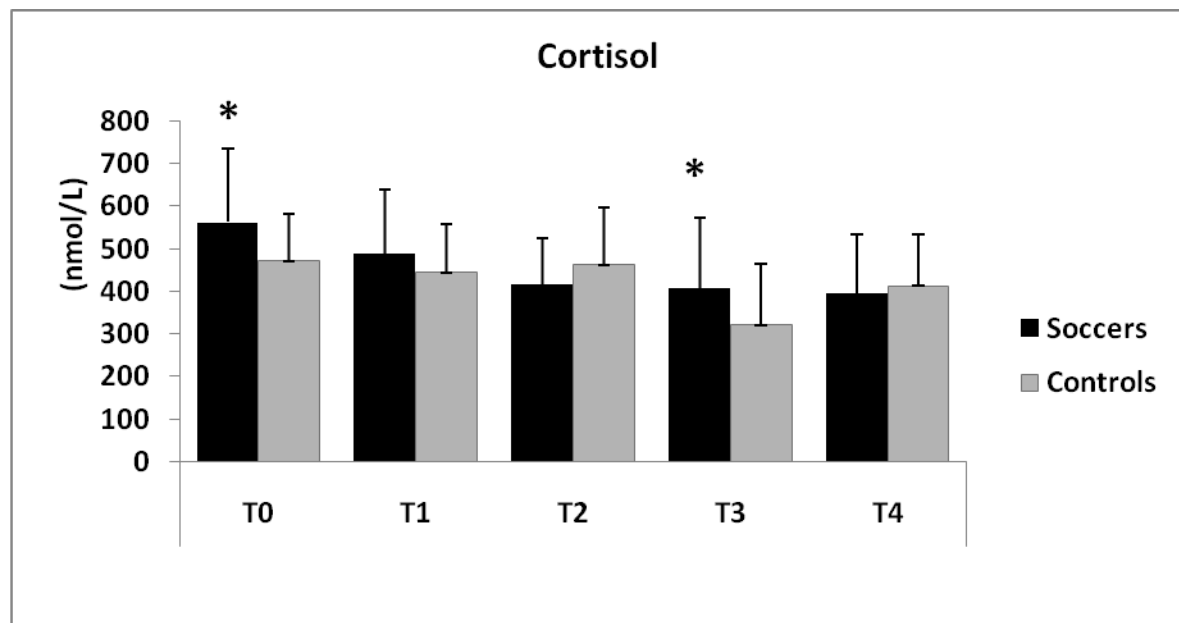
Significant correlations; *: $p < 0.05$.

Figure 1: Testosterone differences between each point-time during 2 seasons on young soccer players compared with control subjects (mean ± SD).



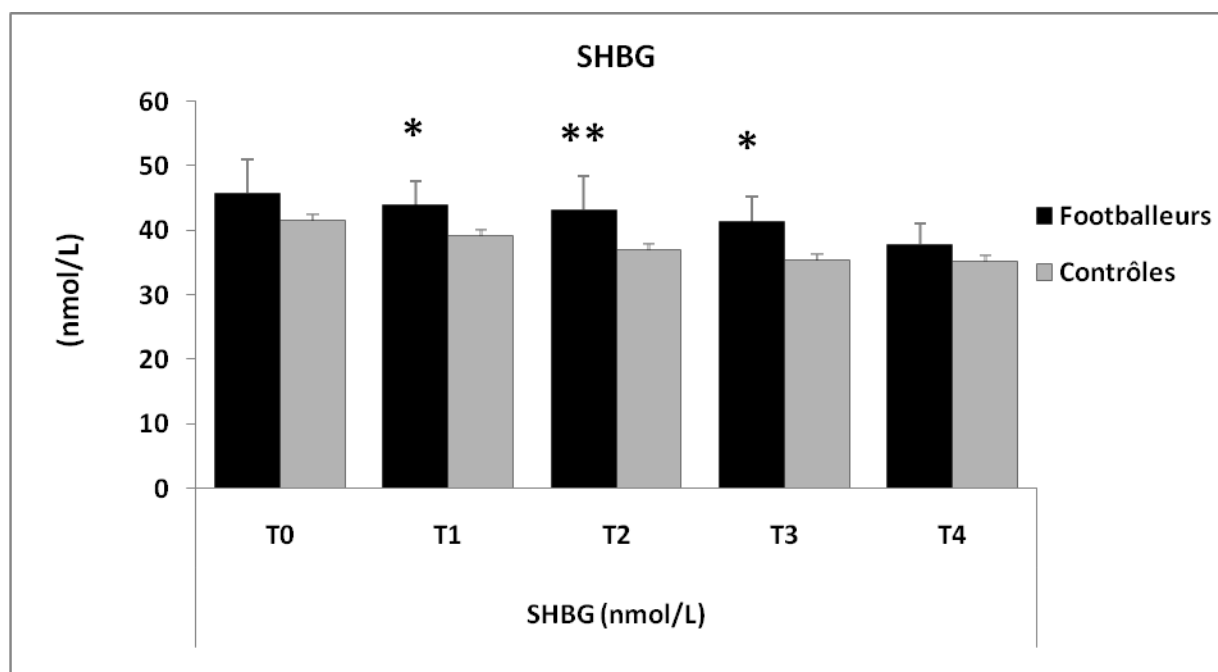
* $p < 0.01$; ** $p < 0.001$: statistical difference between groups.

Figure 2: Cortisol differences between each point-time during 2 seasons on young soccer players compared with control subjects (mean \pm SD).



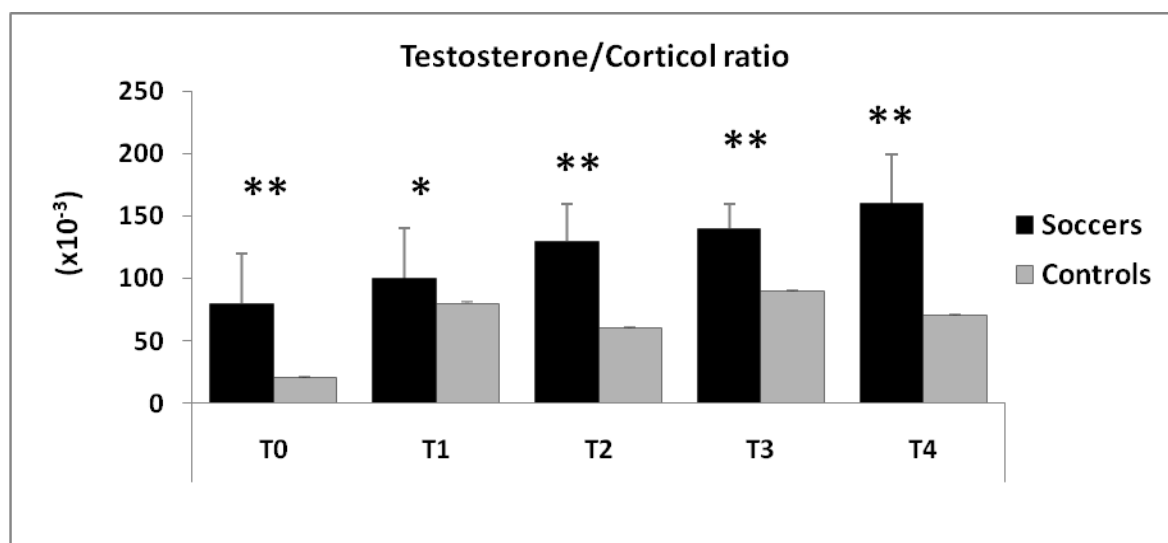
* $p < 0.01$: statistical difference between groups

Figure 3: SHBG differences between each point-time during 2 seasons on young soccer players compared with control subjects (mean \pm SD).



- * $p < 0.01$; ** $p < 0.001$: statistical difference between groups

Figure 4: T/C differences between each point-time during 2 seasons on young soccer players compared with control subjects (mean \pm SD).



- * p < 0.01; ** p < 0.001: statistical difference between groups